

Anwendbarkeit geoelektrischer Verfahren bei der Überwachung der CO₂-Speicherung am Pilotstandort Ketzin

Von der Fakultät für Physik und Geowissenschaften
der Universität Leipzig
genehmigte

D I S S E R T A T I O N

zur Erlangung des akademischen Grades
doctor rerum naturalium
Dr. rer. nat.,

vorgelegt

von	Dipl.-Geophys. Dana Kießling
geboren am	03.06.1980 in Greifswald
Gutachter:	Prof. Dr. Michael Korn Prof. Dr. Andreas Weller
Tag der Verleihung:	26.02.2018

Bibliographische Beschreibung:

Kießling, Dana

Anwendbarkeit geoelektrischer Verfahren bei der Überwachung der CO₂-Speicherung am Pilotstandort Ketzin

Universität Leipzig, Dissertation

208 S., 238 Lit., 58 Abb., 16 Tab., 3 Anlagen

Referat:

Am Pilotstandort Ketzin (Deutschland) war die Überwachung der CO₂-Injektion und der CO₂-Ausbreitung im tiefen Untergrund eines Sandsteinreservoirs erstmalig Gegenstand intensiver geoelektrischer Untersuchungen. Die vorliegende Dissertation liefert geoelektrische Erkenntnisse in einem durchgeführten wissenschaftlichen Praxistest im ersten landgestützten Feldexperiment in Europa. Die Pilotanlage umfasst eine Injektionsbohrung und zwei Beobachtungsbohrungen. Die Messungen dieser Arbeit wurden im Rahmen des europäischen Forschungsprojektes CO₂SINK in Zusammenarbeit des Helmholtz-Zentrum Potsdams (Deutsches GeoForschungs-Zentrum, GFZ) mit der Universität Leipzig durchgeführt. Es ergaben sich folgende konkreten Fragestellungen: Kann die CO₂-Speicherung in Ketzin mithilfe geoelektrischer Verfahren überwacht und abgebildet werden? Wie kann ein geoelektrisches Monitoring technisch und wissenschaftlich realisiert werden? Eine Herausforderung dieser Arbeit ist somit auch die technische Realisierung der geoelektrischen Begleitung der Installation, des Einbaus sowie der Zementation der Bohrlochelektroden. Für die wissenschaftliche Umsetzung wurden einerseits geoelektrische Messungen in einer und in mehreren der drei Bohrungen durchgeführt, andererseits kombiniert an der Erdoberfläche und in den Bohrungen. Neben Stabilitätsprüfungen der Messwerte vor dem Beginn der CO₂-Injektion fanden umfangreiche geoelektrische Messungen zur zeitlichen und räumlichen Überwachung der Vorinjektionsmaßnahmen und der CO₂-Speicherung statt.

Die durchgeführten geoelektrischen Bohrlochmessungen bildeten die CO₂-Ausbreitung um den Injektionspunkt in einer Tiefe von rund 640 m in den Grenzen ihres Auflösungsvermögens und im Hinblick auf die geologischen Gegebenheiten wie Schichtmächtigkeit und Schichtneigung ab. Die Bereiche zwischen dem CO₂-Injektionspunkt und der CO₂-Front ließen sich im zeitlichen Injektionsverlauf unterschiedlich gut auflösen. Je höher die CO₂-Injektionsrate war und je kontinuierlicher das CO₂ injiziert wurde, desto besser ließen sich diese Zwischenbereiche geoelektrisch abbilden. Während sich die Form, die Größe und die Lage des injizierten CO₂ gut auflösen ließen, konnten dünne Ausbreitungspfade nicht detektiert werden. Das hatte zur Folge, dass nicht alle Bereiche der CO₂-Fahne vollständig aufgelöst und abgebildet werden konnten. Darüber hinaus lieferten die kombinierten geoelektrischen Messungen wichtige Erkenntnisse zum allgemeinen CO₂-Ausbreitungstrend in nord-westliche Richtung. Die anisotrope Ausbreitung außerhalb des Beobachtungsraumes der Bohrlochmessanordnung konnte somit dennoch nachgewiesen werden.

Die in der vorgelegten Dissertation erzielten Ergebnisse sind wegweisend für nachfolgende Projekte zur Speicherung von CO₂ und anderer anthropogen verursachter Abfallstoffprodukte. Es wurde ein Beitrag zum Nachweis der prinzipiellen Anwendbarkeit der Geoelektrik als Überwachungsmethode in der CO₂-Speicherung geleistet und diese beurteilt.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Forschung	5
2.1	Theoretische Grundlagen der Gleichstrom-Geoelektrik	5
2.1.1	Prinzip geoelektrischer Messungen	6
2.1.2	Der spezifische elektrische Widerstand	8
2.1.3	Elektrodenkonfigurationen	10
2.1.4	Signalverarbeitung und 3D-Inversion	16
2.1.5	Kurze Einführung in die petrophysikalischen Eigenschaften	22
2.2	Kurze Einführung in die CO ₂ -Speicherung	24
2.3	Methoden zur Überwachung der CO ₂ -Speicherung	29
2.3.1	Kurze Einführung in die großskalige Tiefengeoelektrik	30
2.3.2	Weltweite CO ₂ -Speicherprojekte und angewandte Methoden zur Überwachung	33
2.3.3	Geoelektrische Verfahren zur Überwachung der CO ₂ -Speicherung	35
2.3.3.1	Modellierungen zur geoelektrischen CO ₂ -Überwachung	37
2.3.3.2	Laborexperimente zur geoelektrischen CO ₂ -Überwachung	38
2.3.3.3	CO ₂ -Speicherstandorte mit geoelektrischer CO ₂ -Überwachung	43
2.3.4	Zusammenfassung der Methodeineignung: Geoelektrik zur Überwachung der CO ₂ -Speicherung	51
3	Pilotstandort Ketzin	53
3.1	Forschungsprojekte am CO ₂ -Pilotstandort Ketzin	53
3.2	Geologie und Lokation des Untersuchungsgebietes	56
3.2.1	Geologie des Untersuchungsgebietes	56
3.2.2	Lokation und Standortwahl der drei Bohrungen	57
3.2.3	Bohrlochverlauf der drei Bohrungen	62
3.2.4	Lithologie am Pilotstandort	66
3.2.4.1	Stuttgart-Formation	66
3.2.4.2	Geologische Deckschichten	68
3.2.5	Zusammenfassung der Standorteignung: Ketzin als CO ₂ -Speicherstandort	68
3.3	Bohrkernuntersuchungen und Monitoringmethoden	69
3.3.1	Gewinnung von Bohrkernen und ihre Gesteinsansprache	70
3.3.2	Laboruntersuchungen an Bohrkernen	71
3.3.3	Widerstands-Bohrlochmessungen	72
3.3.4	Aktives seismisches Monitoring	76
3.3.5	Temperaturmonitoring	78
3.3.6	Geochemisches Monitoring	81
3.3.7	Weitere Monitoringmethoden	83
4	Geoelektrische Messungen im Bohrloch zur Überwachung der CO₂-Ausbreitung	85
4.1	Technischer Aufbau des permanenten Vertikalelektrodensystems	86
4.2	Phase I: Installation, Einbau und Zementation der Bohrlochelektroden	94

4.2.1	Exakte Elektrodenpositionierung	94
4.2.2	Kontrolle der isolierten Verrohrung auf Beschädigung	98
4.2.2.1	Versuchsaufbau und Datenakquisition	99
4.2.2.2	Ergebnisse	100
4.2.2.3	Interpretation und Diskussion	100
4.2.3	Überprüfung der Verbindung zwischen installierter Elektrode und Messkabel	102
4.2.3.1	Versuchsaufbau und Datenakquisition	103
4.2.3.2	Ergebnisse	104
4.2.3.3	Interpretation und Diskussion	105
4.2.4	Überwachung der Zementation der Elektroden im Bohrlochringraum	107
4.2.4.1	Versuchsaufbau und Datenakquisition	108
4.2.4.2	Ergebnisse	110
4.2.4.3	Interpretation und Diskussion	111
4.2.5	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse von Phase I	112
4.3	CO ₂ -Injektion	114
4.3.1	Vorinjektionsmaßnahmen und CO ₂ -Injektionsverlauf	114
4.3.2	Technische Umsetzung der CO ₂ -Injektion	115
4.4	Phase II: Geoelektrische Messungen im Bohrloch vor dem Start der CO ₂ -Injektion	117
4.4.1	Zeitliche Überwachung der elektrischen Ankopplung der Bohrlochelektroden in Ktzi200, Ktzi201 und Ktzi202	118
4.4.1.1	Versuchsaufbau und Datenakquisition	118
4.4.1.2	Ergebnisse	118
4.4.1.3	Interpretation und Diskussion	122
4.4.2	Zeitliche Überwachung spezieller Elektrodenanordnungen in jeweils einer Bohrung	123
4.4.2.1	Versuchsaufbau und Datenakquisition	123
4.4.2.2	Ergebnisse	125
4.4.2.3	Interpretation und Diskussion	126
4.4.3	Geoelektrische Bohrloch-Bohrloch-Messungen in Ktzi200, Ktzi201 und Ktzi202	127
4.4.3.1	Versuchsaufbau und Datenakquisition	127
4.4.3.2	Ergebnisse	128
4.4.3.3	Interpretation und Diskussion	131
4.4.4	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse von Phase II	133
4.5	Phase III: Geoelektrische Messungen im Bohrloch während der CO ₂ -Injektion	136
4.5.1	Zeitliche Überwachung der elektrischen Ankopplung der Bohrlochelektroden in Ktzi200, Ktzi201 und Ktzi202	136
4.5.1.1	Versuchsaufbau und Datenakquisition	136
4.5.1.2	Ergebnisüberblick	137
4.5.1.3	Zeitlicher Verlauf der Ankopplungsmessungen in der Injektionsbohrung und Interpretation der Ergebnisse	140
4.5.1.4	Übersicht der Ankopplungsmessungen in den beiden Beobachtungsbohrungen und Interpretation der Ergebnisse	142

4.5.2	Zeitliche Überwachung spezieller Elektrodenanordnungen in jeweils einer Bohrung	147
4.5.2.1	Versuchsaufbau und Datenakquisition	147
4.5.2.2	Ergebnisse	148
4.5.2.3	Interpretation und Diskussion	151
4.5.3	Geoelektrische Bohrloch-Bohrloch-Messungen in Ktzi200, Ktzi201 und Ktzi202	156
4.5.3.1	Versuchsaufbau und Datenakquisition	156
4.5.3.2	Ergebnisse	156
4.5.3.3	Interpretation und Diskussion	159
4.5.4	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse von Phase III	162
4.6	Diskussion zur Eignung der Bohrlochmessenordnung	165
4.7	Diskussion zur Funktionsfähigkeit der Bohrlochelektroden	171
5	Geoelektrische Oberflächen-Bohrloch- und Oberflächen-Oberflächen-Messungen zur Überwachung der CO₂-Ausbreitung	175
5.1	Versuchsaufbau und Datenakquisition	176
5.1.1	Oberflächenmessenordnung	177
5.1.2	Bohrlochmessenordnung	182
5.1.3	Zeitliche Einordnung	182
5.2	Auswertung der Messdaten im Frequenzbereich	184
5.2.1	Zeitreihen und Amplitudenspektren	185
5.2.2	Verteilung der scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstände	186
5.3	Inversionsergebnisse	188
5.4	Interpretation und Diskussion	193
5.5	Diskussion zum Ergebnisvergleich zwischen geoelektrischen und anderen Überwachungsmethoden in Ketzin	197
6	Zusammenfassung und Diskussion	204
	Literaturverzeichnis	209
	Anhang	227
A.1	Tiefenangaben: verwendete Bezugssysteme in dieser Arbeit	227
A.2	Tabellen	229
A.3	Abbildungen	242
	Abkürzungsverzeichnis	244

1. Einleitung

Der natürliche Treibhauseffekt der Erdatmosphäre hat einen wichtigen Einfluss auf das Klima. Verursacht wird dieser Effekt durch Treibhausgase. Ein wichtiger Vertreter dabei ist Kohlenstoffdioxid (CO_2 ; Bauer *et al.*, 2009). Aufgrund von anthropogenen Einflüssen steigt die Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre stetig an. So hat die mittlere CO_2 -Konzentration im Vergleich zum vorindustriellen Niveau bereits um über 40 % zugenommen (Howard, 2014; Zeebe *et al.*, 2016). Als primäre Auswirkung der dauerhaft hohen CO_2 -Konzentration in der Erdatmosphäre ist eine erhöhte globale Durchschnittstemperatur zu verzeichnen, die als Langzeiteffekt auch in Zukunft weiter ansteigt. Sie hat beispielsweise geologische, meteorologische, biologische und politische Folgen, die bereits spürbar sind (z.B. Fischer, 2013).

Als eine potentielle Maßnahme zur Reduktion der anthropogenen Treibhausgasemission kommt dabei die Technologie zur Abscheidung und Speicherung von CO_2 im tiefen geologischen Untergrund (CCS Technologie) in Betracht (IPCC, 2005). Die weltweite CO_2 -Aufnahmekapazität der wichtigsten geologischen Speichermöglichkeiten wird insgesamt auf etwa 2.000 bis 11.000 Gt CO_2 abgeschätzt (ICPP, 2005). Im Vergleich dazu betrugen die energiebedingten CO_2 -Emissionen im Jahr 2013 weltweit 35,1 Gt CO_2 , für Deutschland im gleichen Jahr 0,84 Gt CO_2 (IWR, 2014). Im Jahr 2015 stiegen die weltweiten energiebedingten CO_2 -Emissionen auf 36,3 Gt CO_2 an (MCC, 2016). Theoretisch existiert für die gesamte weltweite anthropogene CO_2 -Emission eine globale CO_2 -Speicherkapazität für mindestens 50 Jahre.

Für eine großmaßstäbliche und damit klimarelevante Umsetzung der CCS Technologie ist eine langfristige Speicherung ohne die Gefährdung von Mensch und Umwelt zwingend erforderlich (Liebscher *et al.*, 2012). Um diese Sicherheit zu gewährleisten, muss die CO_2 -Speicherung im geologischen Untergrund in Pilotanlagen wissenschaftlich erforscht werden. Eine Überwachung (Monitoring) des eingebrachten CO_2 in der Speicherformation ermöglicht detaillierte Rückschlüsse auf sein Verhalten und seine Ausbreitung während der CO_2 -Speicherung unterhalb der Erdoberfläche.

Die Geoelektrik ist für zukünftiges Monitoring der klimarelevanten CO_2 -Speicherung eine vielversprechende geophysikalische Methode (Ramirez *et al.*, 2003; Christensen *et al.*, 2006). Die ihr getellten Erwartungen im Vergleich zu kommerziell eingesetzten und bereits etablierten Standardmethoden, wie beispielsweise der Seismik, sind vielseitig. Vom Einsatz der Geoelektrik wird eine Reduktion der Monitoringkosten, eine Verringerung des Messaufwandes im Allgemeinen und die Möglichkeit einer

kontinuierlichen Überwachung durch eine permanente Installation des Messsystems in allen Bohrungen im Speziellen erhofft. Obwohl diese geoelektrische Überwachungsmethode vielversprechend ist, fehlten vorerst praktische Erfahrungen und Messungen in Feldversuchen (Hovorka *et al.*, 2013).

Im ersten landgestützten Feldexperiment in Europa, am CO₂-Speicherstandort Ketzin, wurden zahlreiche, verschiedene Monitoringmethoden in einem umfangreichen Forschungsprogramm eingesetzt. Die hier vorgestellten geoelektrischen Messungen wurden im Rahmen des europäischen Forschungsprojektes CO₂SINK in Zusammenarbeit des Helmholtz-Zentrum Potsdams (Deutsches GeoForschungs-Zentrum, GFZ) mit dem Institut für Geophysik und Geologie der Universität Leipzig durchgeführt. Die CO₂-Speicherung erfolgte in salzwasserführende, poröse Sandsteine der Stuttgart-Formation in rund 640 m Tiefe. Die Pilotanlage umfasst eine Injektionsbohrung und zwei Beobachtungsbohrungen.

Die hier vorgelegte Dissertation umfasst die wissenschaftliche Erprobung der Anwendung geoelektrischer Verfahren zur Überwachung der CO₂-Speicherung in Ketzin. Es ergaben sich folgende konkreten Kernfragestellungen:

- Inwieweit kann die CO₂-Speicherung in Ketzin mithilfe geoelektrischer Verfahren überwacht, sowie ihre räumliche und zeitliche Ausbreitung im Reservoir abgebildet werden?
- Wie kann solch ein geoelektrisches Monitoring technisch und wissenschaftlich realisiert werden?

Die Herausforderungen dieser Arbeit umfassten somit auch die technische Umsetzung der geoelektrischen Begleitung der Installation, des Einbaus sowie der Zementation der Bohrlochelektroden.

Für die wissenschaftliche Umsetzung der geoelektrischen Überwachung der CO₂-Ausbreitung im Reservoir wurden einerseits geoelektrische Messungen in einer und in mehreren der drei Bohrungen durchgeführt, andererseits kombiniert an der Erdoberfläche und in den Bohrungen.

Neben Stabilitätsprüfungen der Messwerte vor dem Beginn der CO₂-Injektion fanden umfangreiche geoelektrische Bohrlochmessungen zur zeitlichen und räumlichen Überwachung der Vorinjektionsmaßnahmen und der CO₂-Speicherung im Sandsteinreservoir statt. Aufgrund der permanenten Installation der Bohrlochelektroden konnten geoelektrische Messungen die CO₂-Speicherung somit räumlich unmittelbar ab

dem Injektionspunkt in der Tiefe und zeitlich unmittelbar mit dem Beginn der Injektion überwachen.

Von besonderem Interesse waren die räumliche Auflösung der CO₂-Ausbreitung im Reservoir in lateraler und vertikaler Richtung zwischen den Bohrungen, sowie die allgemeine Reichweite außerhalb des inneren Beobachtungsraumes. Aufgrund der angenommenen geologischen Verhältnisse im Speicherhorizont konnte eine Vorzugsrichtung bei der CO₂-Ausbreitung angenommen werden. Da aus technischen Gründen die ursprünglich geplante Injektionsbohrung verlegt werden musste, war mit einer CO₂-Ausbreitungsrichtung weg von den beiden Beobachtungsbohrungen zu rechnen. Kombinierte geoelektrische Messungen an der Erdoberfläche und in den Bohrungen boten eine vielversprechende Chance, einen solchen Ausbreitungstrend im Reservoir aufgrund des größeren Beobachtungsraumes im Vergleich zu den geoelektrischen Bohrlochmessungen abzubilden.

Die Erarbeitung des jeweiligen Versuchsaufbaus der technischen Kontrollmessungen, der geoelektrischen Bohrlochmessungen und der kombinierten geoelektrischen Messungen, sowie die Datenaufnahme waren ausschließlich Aufgaben der hier vorgelegten Dissertation. Es entstand bisher eine Dissertation von Wagner (2016), die u.a. einen hydrogeophysikalischen Modellierungs- und Inversionsansatz vorstellte sowie die optimierte Anordnung der Bohrlochelektroden und den Einfluss des Bohrlochringraumes untersuchte. Es wird darauf hingewiesen, dass neben den, im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten, geoelektrischen Bohrlochmessungen zusätzliche Messungen mit einem weiteren Messgerät und unter Nutzung anderer Messkonfigurationen stattfanden. Dazu wird auf entsprechende Publikationen an entsprechender Stelle verwiesen. Des Weiteren wird in der vorliegenden Arbeit die Bohrlochmessanordnung bewertet und Optimierungsansätze vorgeschlagen, sowie die Funktionstüchtigkeit der einzelnen Bohrlochelektroden diskutiert.

Auf der, in dieser Dissertation geschaffenen, Grundlage der kombinierten geoelektrischen Messdaten entstand bisher eine Dissertation von Bergmann (2012), die sich u.a. mit der Kombination von seismischen und geoelektrischen 3D-Daten anhand einer strukturbasierten Inversion beschäftigte (Bergmann *et al.*, 2014). Dazu wurden die Messdaten in weiteren Untersuchungen im Zeitbereich ausgewertet (Bergmann *et al.*, 2012). Im Gegensatz dazu findet die Auswertung in der vorliegenden Arbeit im Frequenzbereich Anwendung.

Mit meinem durchgeführten wissenschaftlichen Praxistest wird ein Beitrag zum Nachweis der prinzipiellen Anwendbarkeit der Geoelektrik als Überwachungsmethode in der CO₂-Speicherung geleistet und eine wichtige Beurteilung geliefert.

Diese Arbeit gliedert sich, neben der Einleitung und der Zusammenfassung, in vier Hauptteile: In Kapitel 2 erfolgt eine kurze Einführung in die Grundlagen der Geoelektrik, die für die durchgeführten Messungen relevant sind. Anschließend werden die Voraussetzungen für eine CO₂-Speicherung analysiert und ihre geologische Machbarkeit aufgezeigt. Es werden ausgewählte physikalische Überwachungsmethoden für die CO₂-Speicherung vorgestellt. Um die Eignung der Geoelektrik einzuschätzen, werden wissenschaftliche Erkenntnisse geoelektrischer Anwendungen der Prozessbeobachtung und Strukturerkundung herangezogen. Da es zum Projektbeginn keine vergleichbaren Anwendungsbeispiele für eine geoelektrische CO₂-Speicherüberwachung gab, werden geoelektrische Voruntersuchungen anhand von Modellierungen und Laborexperimenten zur geoelektrischen CO₂-Überwachung betrachtet. Zusätzlich wird jeweils der aktuelle Forschungsstand an zwei wissenschaftlich genutzten CO₂-Speicherstandorten mit geoelektrischem Monitoring zusammengefasst, die zeitnah zu Ketzin stattfanden, allerdings einen geringeren geoelektrischen Messumfang besaßen.

Kapitel 3 beschreibt den wissenschaftlichen Rahmen des Pilotprojektes, sowie die Geologie und Lithologie des Untersuchungsgebietes. Es wird auf die Beurteilung der Standorteignung eingegangen und die drei Bohrungen näher beschrieben, bevor die einzelnen Monitoringmethoden, die in Ketzin Anwendung fanden, vorgestellt werden.

In Kapitel 4 werden geoelektrische Verfahren zur technischen Realisierung der geoelektrischen Begleitung der Installation, des Einbaus sowie der Zementation der Bohrlochelektroden angewandt. Für die wissenschaftliche Realisierung der zeitlichen und räumlichen Überwachung der Vorinjektionsmaßnahmen und der CO₂-Speicherung wurden geoelektrische Bohrlochmessungen in einer und in mehreren der drei Bohrungen durchgeführt.

Die wissenschaftliche Umsetzung von kombinierten geoelektrischen Messungen an der Erdoberfläche und in den Bohrungen wird in Kapitel 5 beschrieben. Es findet ein abschließender Ergebnisvergleich zwischen geoelektrischen und anderen Überwachungsmethoden in Ketzin statt.

Im Anhang sind die verwendeten Tiefenangaben und Bezugssysteme näher erklärt, alle relevanten Informationen zu den durchgeführten geoelektrischen Einzelmessungen aufgelistet und ergänzende Abbildungen dargestellt.

2. Stand der Forschung

Um die Geoelektrik mit ihren Stärken und Schwächen aussagekräftig zu beurteilen, sowie die Installationsmaßnahmen und die Umsetzung der Messungen der vorliegenden Dissertation besser nachzuvollziehen, wird im ersten Unterkapitel eine kurze Einführung in die Grundlagen der Gleichstrom-Geoelektrik mit seinen relevanten petrophysikalischen Eigenschaften gegeben (Kap. 2.1). Anschließend werden die Voraussetzungen und die geologische Realisierung einer CO₂-Speicherung geklärt (Kap. 2.2). Zur besseren Einschätzung der Methodeneignung werden wissenschaftliche Erkenntnisse geoelektrischer Messungen aus Anwendungsbereichen der Prozessbeobachtung und Strukturerkundung herangezogen. Es folgt abschließend ein Überblick über den Stand der Forschung in der Speicherung von Kohlenstoffdioxid (CO₂) im Untergrund anhand von Beispielen für weltweite CO₂-Speicherstandorte und der dort angewandten Methoden zur Überwachung der CO₂-Injektion und langfristigen CO₂-Speicherung (Kap. 2.3).

2.1 Theoretische Grundlagen der Gleichstrom-Geoelektrik

Dieses Kapitel führt in die theoretischen Grundlagen der Gleichstrom-Geoelektrik ein und erläutert das Prinzip geoelektrischer Messungen. Es wird der Begriff des spezifischen elektrischen Widerstandes definiert und der Begriff der elektrischen Tomographie erläutert. Gebräuchliche Elektrodenkonfigurationen werden hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit und ihrer Grenzen diskutiert. Es folgt eine kurze Einführung in die Zeitreihenbearbeitung und in das verwendete 3D-Inversionsverfahren zur Auswertung der gemessenen geoelektrischen Daten. Zum Abschluss wird kurz auf die petrophysikalischen Eigenschaften eingegangen. Es werden die drei Leitfähigkeitsmechanismen und ihr Einfluss auf die Gesamtleitfähigkeit der Gesteine erläutert.

2.1.1 Prinzip geoelektrischer Messungen

Zu den klassischen Verfahren der Geoelektrik gehört u.a. das Gleichstromverfahren. Da es in dieser Arbeit Anwendung findet, soll es an dieser Stelle genauer betrachtet werden. Sie umfasst geoelektrische Verfahren, die

- stationäre (zeitlich unveränderlichen) Ströme und Felder sowie
- zeitliche (hinreichend) langsam veränderliche (niederfrequente) Wechselströme (alternierender bzw. quasistationärer Gleichstrom zur Vermeidung von störenden Polarisierungseffekten) nutzen.

Über Elektroden werden elektrische Ströme galvanisch in den Boden eingespeist. Dabei bauen sich künstliche elektrische Felder (Potentialfelder) auf. Diese Ströme bzw. Felder werden eingespeiste (injizierte) oder primäre Ströme bzw. Felder genannt. Die eingespeisten Ströme breiten sich entsprechend nach den physikalischen Grundgesetzen der dynamischen Theorie des elektromagnetischen Feldes von Maxwell (Maxwellschen Gleichungen) im mehr oder weniger gut leitenden Untergrund als Potentialfeld aus (Maxwell, 1865). Im Wesentlichen wird es von der räumlichen Verteilung der physikalischen Eigenschaften der Gesteine (wie beispielsweise dem spezifischen elektrischen Widerstand) bestimmt. Umgekehrt ist zu erwarten, dass anhand von Messungen der Potentialdifferenz (Spannungsdifferenz) zwischen zwei weiteren Elektroden an der Erdoberfläche oder im Bohrloch, auf die Verteilung leitfähiger Untergrundstrukturen und deren spezifische elektrische Widerstände gefolgert werden kann.

Die Idee der Verwendung einer solchen Vierpunktanordnung zur Bestimmung eines (scheinbaren) spezifischen elektrischen Widerstands geht dabei auf Frank Wenner zurück (Wenner, 1916). Auch die Gebrüder Schlumberger spielen bei der Entwicklung der Gleichstromgeoelektrik eine wichtige Rolle. Sie wendeten erstmals das Grundprinzip aller geoelektrischen Messungen an: Aus der Stromeinspeisung und der gleichzeitigen Registrierung der Potentialdifferenz zwischen jeweils zwei Elektroden ist der spezifische elektrische Widerstand des Untergrundes bestimmbar (Schlumberger & Schlumberger, 1930).

Um räumliche Strukturen im Untergrund oder in einem Untersuchungsobjekt bestimmen zu können, werden tomographische Verfahren verwendet. Sie zählen zu den bildgebenden Verfahren, die Schnittbilder und somit ein Abbild der Verteilung eines physikalischen Parameters des Untersuchungsobjektes zerstörungsfrei liefern. Bedeutende Anwendungen tomographischer Verfahren erfolgen beispielsweise in der

diagnostischen Medizin in Form von Computertomographie (CT), Magnetresonanztomographie (MRT) und Ultraschalltomographie. Tomographische Verfahren werden aber auch in vielen anderen Bereichen wie in der Werkstoffprüfung und bei der Überwachung industrieller Prozesse eingesetzt.

Mit der Entwicklung leistungsfähiger Computer konnten sich bildgebende Verfahren nicht nur bei medizinischen Fragestellungen (z.B. Henderson & Webster, 1978), sondern auch in der Geophysik etablieren. Es wurden neue Methoden zur Modellierung (z.B. Mufti, 1976; Dey & Morrison, 1979) und zur geophysikalischen Bildgebung (z.B. Lytle & Dines, 1978) entwickelt. Sie führten so zur Anwendbarkeit der elektrischen Widerstandstomographie (engl.: *electrical resistivity tomography*, ERT). Daily & Owen (1991) nutzten erstmals Bohrlochelektroden zur Abbildung der Widerstandsverteilung zwischen zwei Bohrungen im Untergrund. Nun konnten hydrogeologische Prozesse (z.B. Grundwasserströmungen, Schadstoffverlagerungen und Injektionsexperimente), die Widerstandsänderungen hervorrufen, auch vom Bohrloch aus geoelektrisch überwacht werden. Ramirez *et al.* (1996) nutzten die elektrische Widerstandstomographie beispielsweise zur Detektion von Leckagen aus großen Untergrundbehältern. In der Literatur existieren zahlreiche weitere Beispiele für die ERT-Anwendung zur hydrogeologischen Prozessüberwachung (z.B. Binley *et al.*, 1997; Slater *et al.*, 2000; Kemna *et al.*, 2002; Slater *et al.*, 2002; Nimmer *et al.*, 2007). Vorzüge der elektrischen Widerstandstomographie sind kostengünstige, automatisierte Messungen mit schneller Datenauswertung. Lediglich das Niederbringen von Bohrungen für die Bohrlochelektroden ist kostenintensiv.

Die elektrische Widerstandstomographie hat sich bei der Untersuchung des (tiefen) Untergrundes in Bohrungen und an der Erdoberfläche, aber auch bei der Untersuchung von Baudenkmälern, Bäumen, Proben von Lockermaterialien und Bohrkernen etabliert. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Bohrlochgeophysik eine wichtige Rolle in der Prozessbeobachtung spielt und vielversprechende Möglichkeiten in der Überwachung der CO₂-Speicherung bietet.

Die Gleichstromgeoelektrik wird im Bohrloch, an der Oberfläche oder in kombinierten Messungen angewandt. Sie bildet die elektrischen Eigenschaften des Untergrundes ab und gibt so Informationen über seinen dreidimensionalen Aufbau. Damit dient sie der strukturellen Erkundung, sowie der Prozessbeobachtung.

2.1.2 Der spezifische elektrische Widerstand

Das Faradaysche Induktionsgesetz bildet eine der vier fundamentalen Gleichungen der Elektrodynamik, der Maxwellschen Gleichungen,

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\dot{\vec{B}} \quad (2.1)$$

die die elektrische Feldstärke \vec{E} und die magnetische Flussdichte \vec{B} in Beziehung zueinander setzt. Für ein homogenes, isotropes Medium, in dem ein stationärer elektrischer Strom \vec{I} mit der Stromdichte \vec{j} fließt, gilt die allgemeine Form des Ohmschen Gesetzes. Durch diese Materialgleichung wird der Einfluss der elektrischen Leitfähigkeit σ als Materialgröße beschrieben:

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E}. \quad (2.2)$$

In der Gleichstromgeoelektrik sind alle Ströme quasistationär. Das bedeutet, dass die magnetische Flussdichte \vec{B} als zeitlich konstant betrachtet wird (d.h. $-\dot{\vec{B}} = -\frac{d\vec{B}}{dt} = 0$). Nach dem Satz von Stokes folgt aus Gleichung (2.1), dass die in den Untergrund eingespeiste elektrische Feldstärke \vec{E} wegen ihrer Wirbelfreiheit in jedem Punkt als negativer Gradient des skalaren elektrischen Potentials φ beschrieben wird:

$$\vec{E} = -\nabla\varphi. \quad (2.3)$$

Durch die Bildung der Divergenz des Vektorfeldes (Bildung eines Skalarfeldes) aus Gleichung (2.2) und das Einsetzen von Gleichung (2.3) erhält man für das skalare elektrische Potential φ eine elliptische partielle Differentialgleichung zweiter Ordnung, die Poisson-Gleichung:

$$-\nabla \cdot \vec{j} = \nabla \cdot (\sigma \cdot \nabla\varphi). \quad (2.4)$$

Das Vorwärtsproblem (Vorwärtsmodellierung) der elektrischen Widerstandstomographie besteht in der Lösung der Gleichung (2.4) für eine Potentialverteilung in einem Medium bekannter Leitfähigkeit σ bei einem vorgegebenen injizierten Strom. Geoelektrische Erkundungsmethoden haben allerdings zum Ziel, eine unbekannte Leitfähigkeitsverteilung des Untergrundes mithilfe von Messungen der Potentialfelder, die beim Anlegen verschiedener Ströme entstehen, abzubilden (Inversionsverfahren). Die gesuchte Materialgröße ist damit der spezifische elektrische Widerstand ρ , für den gilt:

$$\rho = \sigma^{-1}. \quad (2.5)$$

Durch Verwendung von Inversionsverfahren wird der reale spezifische elektrische Widerstand ρ aus den aufgenommenen Messdaten rekonstruiert. Die Rechenalgorithmen nutzen dabei die Finite-Differenzen- (engl.: *finite difference method, FDM*) oder die Finite-Elemente-Methoden (engl.: *finite element method, FEM*).

Außerhalb der Stromquellen gilt im homogenen Halbraum wegen $\nabla \cdot (\sigma \cdot \nabla \varphi) = 0$ (Gleichung 2.4) für das elektrische Potential φ die Laplace-Gleichung:

$$\Delta \varphi = 0. \quad (2.6)$$

Bei einer punktförmigen Einspeisung eines Gleichstroms der Stromstärke I gilt für die Stromdichte \vec{j} mit dem Abstand r im homogenen, isotropen Halbraum:

$$\vec{j} = \frac{I}{2\pi r^2} \vec{e}_r. \quad (2.7)$$

Bei geoelektrischen Messungen werden die Strom- und Potentialelektroden häufig als punktförmig betrachtet, da die Abstände der Elektroden zueinander häufig größer sind als ihre räumliche Ausdehnung (Länge und Durchmesser).

Aus Gleichung (2.2) und Gleichung (2.7) folgt für das elektrische Feld:

$$\vec{E} = \rho \cdot \vec{j} = \frac{\rho \cdot I}{2\pi r^2} \vec{e}_r. \quad (2.8)$$

Da das elektrische Feld \vec{E} der Gradient des skalaren elektrischen Potentials φ ist (Gleichung 2.3), lässt sich das elektrische Potential φ für den homogenen, isotropen Halbraum auch schreiben als:

$$\varphi = \frac{\rho \cdot I}{2\pi r}. \quad (2.9)$$

Potentiale können nicht direkt gemessen werden, sondern nur Potentialdifferenzen. Da der Übergangswiderstand an der Elektrode bei der Stromeinspeisung und bei gleichzeitiger Messung der Potentialdifferenz nicht vernachlässigbar ist, werden zur Stromeinspeisung und Spannungsmessung jeweils zwei verschiedene Elektrodenpaare unabhängig voneinander verwendet. Bei der sogenannten Vierpunktanordnung überlagern sich die Potentiale nach dem Superpositionsprinzip. Für die Messgröße scheinbarer spezifischer Widerstand ρ_s (engl.: *apparent resistivity, ρ_a*) ergibt sich mit der gemessenen Potentialdifferenz $\Delta\varphi$:

$$\rho_s = \frac{\Delta\varphi}{I} \cdot k, \quad (2.10)$$

wobei der Faktor k auch Konfigurations- bzw. Geometriefaktor genannt wird. Er hängt von der räumlichen Lage der Elektroden der Vierpunktanordnung zueinander ab.

Ausgewählte Beispiele für Gesteinswiderstände sind in Tabelle 2.1 zusammengefasst.

2.1.3 Elektrodenkonfigurationen

Als Elektrodenkonfiguration wird die Messanordnung der vier Elektroden A, B, M und N zueinander bezeichnet. Ihre Aufstellung an der Erdoberfläche bzw. im Bohrloch ist beliebig. Im Gelände werden die verwendeten Elektroden häufig auf geraden Profilen in äquidistanten Abständen angeordnet. Auf dem entstandenen Elektrodenraster des Profils wird dann eine Elektrodenkonfiguration oder auch eine Kombination aus mehreren Anordnungen gemessen. Jede Elektrodenkonfiguration liefert dabei einen anderen Informationsgehalt. Er hängt beispielsweise von der Eindringtiefe und dem Auflösungsvermögen der Konfiguration ab und wird durch logistische und messtechnische Randbedingungen bestimmt.

Tab. 2.1: Zusammenstellung ausgewählter spezifischer elektrischer Widerstände ρ für Lockersedimente, Festgesteine und Wässer (nach Knödel *et al.*, 2005).

Material	Wertebereich (Ωm)
Kies	50 (wassergesättigt) ... $> 10^4$ (trocken)
Sand	50 (wassergesättigt) ... $> 10^4$ (trocken)
Schluff	20 ... 50
Ton (erdfeucht)	3 ... 30
Ton (trocken)	> 1.000
Sandstein	< 50 (klüftig, feucht) ... $> 10^5$ (kompakt)
Kalkstein	100 (klüftig, feucht) ... $> 10^5$ (kompakt)
Tonschiefer	50 (klüftig, feucht) ... $> 10^5$ (kompakt)
destilliertes Wasser	$> 10^3$
natürliche Wässer	10 ... 300
Meerwasser (35‰ NaCl)	0,25
Salzlaugen	$< 0,1$

Für alle gebräuchlichen Elektrodenkonfigurationen gilt das Reziprozitätsprinzip. Da das Vertauschen von Strom- und Spannungselektroden keinen Einfluss auf den gemessenen scheinbaren spezifischen Widerstand ρ_s hat, folgt aufgrund dieser Symmetrie aus Gleichung (2.10) auch, dass der Konfigurationsfaktors k davon unbeeinflusst bleibt.

Für die Vierpunktanordnung (Abb. 2.1) überlagern sich die Potentiale der Stromelektroden A und B (engl.: *current electrodes* C_1, C_2) ungestört nach dem Superpositionsprinzip. Für die Potentiale φ_M und φ_N an den Spannungselektroden M und N (engl.: *potential electrodes* P_1, P_2) ergibt sich aus Gleichung (2.9):

$$\varphi_M = \frac{\rho \cdot I}{2\pi} \cdot \left(\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} \right) \text{ und } \varphi_N = \frac{\rho \cdot I}{2\pi} \cdot \left(\frac{1}{r_{AN}} - \frac{1}{r_{BN}} \right), \quad (2.11)$$

während somit für die gemessene Potentialdifferenz $\Delta\varphi = \varphi_M - \varphi_N$ folgt:

$$\Delta\varphi = (\varphi_{AM} + \varphi_{BM}) - (\varphi_{AN} + \varphi_{BN}) = \varphi_{AM} + \varphi_{BM} - \varphi_{AN} - \varphi_{BN} \quad (2.12)$$

$$\Delta\varphi = \frac{\rho \cdot I}{2\pi} \cdot \left(\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}} \right) = \frac{\rho \cdot I}{2\pi k}. \quad (2.13)$$

Wird über zwei Elektroden ein Strom injiziert und gleichzeitig an demselben Elektrodenpaar die Potentialdifferenz gemessen, tritt ein elektrischer Kontaktwiderstand (ein sogenannter Übergangswiderstand oder Ankopplungs-widerstand) auf. Ist die Elektrode von einem Medium hoher elektrischer Leitfähigkeit umgeben, so wird ein geringer elektrischer Ankopplungswiderstand gemessen. Zur Vermeidung von Übergangswiderständen bei geoelektrischen Messungen zur Erkundung des Untergrundes werden daher Vierpunktanordnungen benutzt.

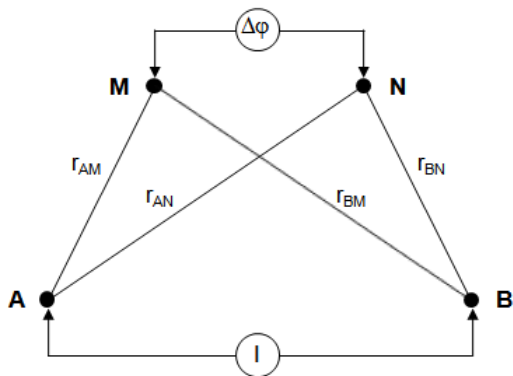


Abb. 2.1: Schematische Darstellung einer Vierpunktanordnung (nach Militzer & Weber, 1985).

Mit den beschriebenen Profilmessungen sind ausschließlich zweidimensionale Erkundungen des Untergrundes möglich. Der Einfluss lateraler Effekte wird somit nicht berücksichtigt. Auch nimmt das Auflösungsvermögen mit zunehmender Tiefe ab. Aufstellungen mit parallelen Profilen oder Kreisauflastungen an der Erdoberfläche, sowie im Untergrund versenkte Elektroden erhöhen das Auflösungsvermögen der Aufstellungen und ermöglichen eine dreidimensionale Untersuchung. Die Sensitivität beschreibt dabei die Empfindlichkeit der gemessenen elektrischen Potentialdifferenzen (und somit auch die Empfindlichkeit der scheinbaren spezifischen Widerstände $\delta\rho_s$) gegenüber den Widerstandskontrasten $\delta\rho$ im Untergrund und beurteilt somit ihr horizontales und vertikales Auflösungsvermögen. Ausgehend vom Sensitivitätstheorem von Geselowitz (1971) ergibt sich für die Sensitivität S vereinfacht:

$$S = \frac{\delta\rho_s}{\delta\rho}. \quad (2.14)$$

Zu den gebräuchlichsten Elektrodenkonfigurationen zählen: Wenner-Alpha (Wenner- α), Wenner-Beta (Wenner- β), Wenner-Gamma (Wenner- γ), Schlumberger, Dipol-Dipol (CCPP), Pol-Dipol und Pol-Pol. Die Anordnungen sind in Abbildung 2.2 skizziert. Weitere Elektrodenkonfigurationen sind beispielsweise die bohrlochübergreifenden Anordnungen Pol-Tripol (B-AMN, z.B. Goes & Meekes, 2002) oder auch Bipol-Bipol (AM-BN, z.B. Schmidt-Hattenberger *et al.*, 2011). In Tabelle 2.2 sind für die gebräuchlichsten Elektrodenkonfigurationen jeweils die Signalstärke (Signal-Rauschverhältnis), das vertikale und laterale Auflösungsvermögen, sowie die Erkundungstiefe (Eindringtiefe) qualitativ bewertet, sowie die Parameter Konfigurationsfaktor k und Elektrodenauslagenlänge L zusammengefasst.

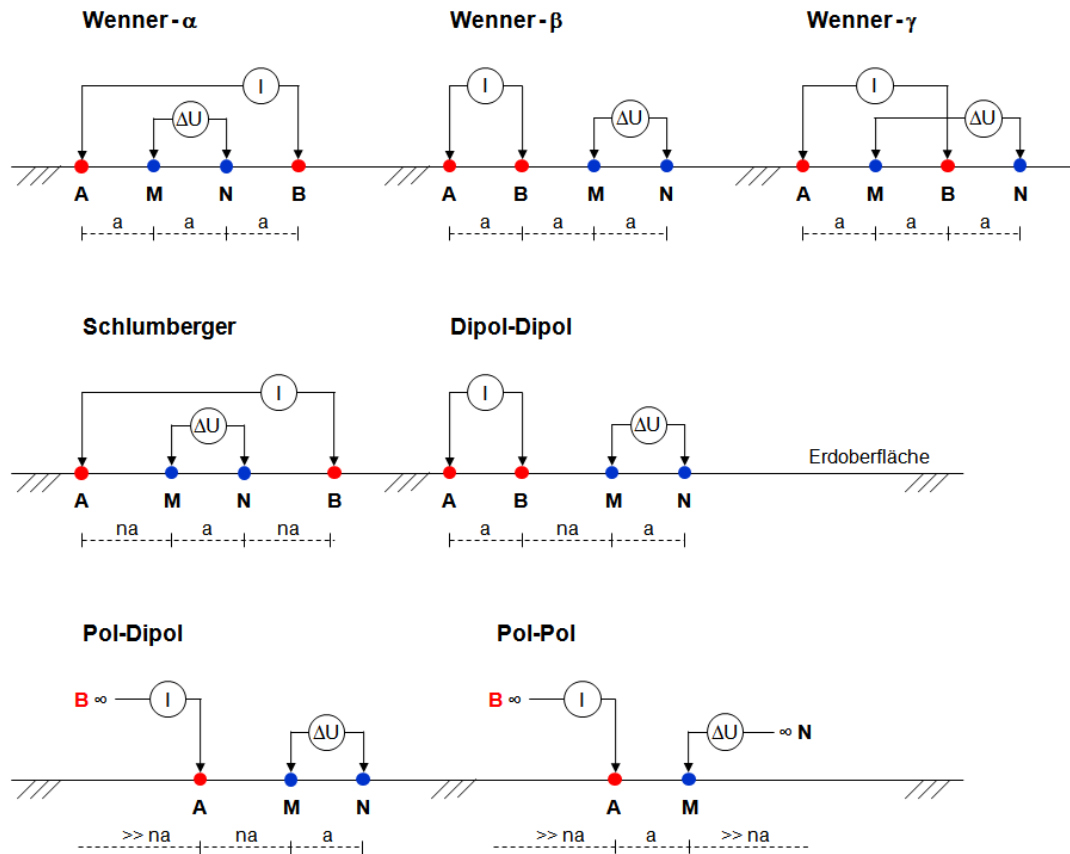


Abb. 2.2: Prinzipskizzen der gebräuchlichsten Elektrodenkonfigurationen. Oben: Wenner- α , Wenner- β und Wenner- γ ; mitte: Schlumberger und Dipol-Dipol; unten: Pol-Dipol und Pol-Pol.

Für die geoelektrischen Messungen im Bohrloch ergeben sich daraus folgende Vor- und Nachteile für eine Überwachung der CO_2 -Speicherung in einem Reservoir:

Machbarkeit:

- + Da Wenner- und Schlumberger-Anordnungen eine hohe Signalstärke besitzen (gutes Signal-Rausch-Verhältnis), sind sie auch in Messgebieten mit hohen (anthropogenen) Störsignalen gut einsetzbar.
- + Da Wenner-Anordnungen eine geringe Erkundungstiefe besitzen, kann bei Messungen im Bohrloch besonders der Nahbereich der Injektionsbohrung überwacht werden. Mit dieser Anordnung kann die Anfangszeit der CO_2 -Injektion überwacht werden, in der sich das CO_2 noch bohrlochnah (etwa 10 -20 m) um die Injektionsbohrung ausbreitet. Besonders Schlumberger-Anordnungen bilden den Nahbereich um die Injektionsbohrung gut ab.

- + Da Dipol-Dipol-Anordnungen eine hohe Erkundungstiefe besitzen, kann mit dieser Anordnung besonders gut die fortgeschrittene CO₂-Injektion mit einem höheren Ausbreitungsfortschritt überwacht werden (etwa 25 - 35 m).
- + Aufgrund des hohen lateralen Auflösungsvermögens von Dipol-Dipol-Anordnungen lässt sich besonders die Mächtigkeit der CO₂-Fahne bei der Ausbreitung im Reservoir gut abbilden. Das CO₂ steigt während und direkt nach der Injektion aufgrund seiner geringeren Dichte gegenüber der des Formationswassers im Reservoir auf, sammelt sich unterhalb der undurchlässigen Deckschicht im oberen Reservoirbereich und breitet sich schließlich entlang dieser Deckschicht von der Injektionsbohrung weg aus (engl.: *fingering*).

Grenzen:

- Aufgrund der geringen Erkundungstiefe der Wenner-Anordnungen können weder der Nahbereich bis etwa 10 m noch die fortgeschrittene CO₂-Injektion mit hohem Ausbreitungsfortschritt (ab etwa 20 m) aufgelöst und überwacht werden.
- Aufgrund der hohen Erkundungstiefe der Dipol-Dipol-Anordnungen können der Nahbereich der Injektionsbohrung, sowie bohrlochnahe Bereiche der beiden Beobachtungsbohrungen (in 50 m bzw. 112 m Entfernung) nicht aufgelöst und überwacht werden.
- Da Dipol-Dipol-Anordnungen eine geringe Signalstärke besitzen (schlechtes Signal-Rausch-Verhältnis), sind sie anfällig gegenüber (anthropogenen) Störeffekten. Zur Verbesserung der Signalqualität sind Mehrfachmessungen sinnvoll.

Tab. 2.2: Qualitative Bewertung (1: sehr gut, bis 4: schlecht) der Eigenschaften einzelner Anordnungen wie Signalstärke, laterales und vertikales Auflösungsvermögen, sowie Erkundungstiefe. Zusammenfassung von Geometriefaktor k und Elektrodenauslagenlänge L (mit Abstand a und Abstandsfaktor n) für diese Anordnungen (nach Knödel *et al.*, 2005). Die qualitative Bewertung beruht dabei auf Ward (1990), während die Daten für die Erkundungstiefen von Barker (1989) stammen.

Elektroden- konfiguration	Wenner	Schlumberger	Dipol-Dipol	Pol-Dipol
Nutz-/ Störsignal	1	2	4	3
Laterale (horizontale) Auflösung	4	3	1	2
Vertikale Auflösung (Schichtauflösung)	1	1	2	2
Einfluss oberflächennaher Inhomogenität	2	1	4	3
Maximale Erkundungstiefe für horizontal geschichteten Untergrund	$0,17\overline{AB}$	$0,19\overline{AB}$	$0,25\overline{AN}$	$0,19\overline{AB}$
Konfigurationsfaktor k (Geometriefaktor)	$2\pi a$	$\pi n(n+1)a$ $n > 3$	$\pi n(n+1)(n+2)a$	$2\pi n(n+1)a$ $n > 3$
Auslagenlänge L	$3a$	$(2n+1)a$	$(2+n)a$	$\gg (2n+1)a$

Für große Erkundungstiefen stößt man bei geoelektrischen Oberflächen-Oberflächen-Messungen mit Schlumberger-Anordnungen aufgrund der großen Kabelauslagen schnell an logistische Grenzen. Als guter Kompromiss zwischen den Abbildungseigenschaften und dem Aufwand beim Feldexperiment hat sich daher die Dipol-Dipol-Anordnung bewährt. Mit der Nutzung versenkter Elektroden (geoelektrische Oberflächen-Bohrloch-Messungen) kann das Auflösungsvermögen gegenüber geoelektrischer Oberflächen-Oberflächen-Messungen wesentlich erhöht werden (Knödel *et al.*, 2005). Traditionell werden geoelektrische Oberflächen-Bohrloch-Messungen mit einer Pol-Pol-Elektrodenkonfiguration angewandt (z.B. Bevc & Morrison, 1991). Allerdings lässt sich diese Anordnung im urbanen Gelände aufgrund vorhandener

Störeinflüsse (unterirdische Leitungen, Metallzäune etc.) und umfangreicher Bebauungen kaum realisieren. Alternativ bieten die Dipol-Dipol-Anordnungen Ergebnisse ähnlich guter Auflösung (Marescot *et al.*, 2002). Am Pilotstandort Ketzin werden daher sowohl geoelektrische Oberflächen-Oberflächen-Messungen als auch geoelektrische Oberflächen-Bohrloch-Messungen (kombinierte geoelektrische Messungen) zur Überwachung der CO₂-Speicherung angewandt.

Aufgrund der diskutierten Vor- und Nachteile wird festgehalten, dass für die in dieser Arbeit beschriebenen geoelektrischen Messungen im Bohrloch eine Kombination von verschiedenen Elektrodenkonfigurationen zur erfolgreichen Überwachung der CO₂-Speicherung am Pilotstandort Ketzin als sinnvoll erachtet wird und in Kapitel 4 Anwendung findet. Zum einen umfassen sie klassische Anordnungen wie Dipol-Dipol, Wenner-Alpha und Wenner-Gamma, zum anderen auch Variationen dieser Anordnungen mit veränderter Elektrodenauslagenlänge (z.B. Schlumberger) sowie Platzierungen der Stromelektroden in unterschiedlichen Bohrungen. Somit finden Messungen innerhalb einer Bohrung, aber auch bohrlochübergreifend in jeweils zwei Bohrungen statt.

2.1.4 Signalverarbeitung und 3D-Inversion

Die gemessenen Potentialdifferenzen werden als Messwertreihen im Zeitbereich aufgenommen. Eine **Signalverarbeitung** hat die Aufgabe, aus den vorgegebenen Stromwerten und den gemessenen Potentialdifferenzen eine Verteilung der scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstände im Untergrund unter Verwendung von Gleichung (2.10) und mit Kenntnis der Geometriewerte aus der räumlichen Dipol-Dipol-Anordnung der kombinierten geoelektrischen Messungen (Kap. 5) zu bestimmen.

Periodische Rechtecksignale lassen sich von allen periodischen Signalformen technisch am leichtesten erzeugen (Radic, 2008). Bei geoelektrischen Messungen werden daher gepulste Rechteckschwingungen (d.h. periodische Rechtecksignale wechselnder Polarität zur Vermeidung von Polarisierungseffekten) am häufigsten zur Stromeinspeisung verwendet. Eine ideal rechteckige Signalform existiert nur theoretisch. Es treten Anstiegs- und Abfallzeiten an den Flanken des Rechtecksignals auf. Aufgrund der induktiven Kopplung zwischen den Messkabeln und der kapazitiven Einkopplung von Störsignalen ist häufig ein Unter- und Überspringen (Gibbs'sches Phänomen) zu beobachten (Radic, 2008).

Die Rohdaten (Primärdaten) werden in der Regel im Zeitbereich verarbeitet. Friedel (2000) beschreibt in seinem Ansatz zur digitalen Nachbearbeitung geoelektrischer Zeitreihen folgende Bearbeitungsschritte:

- Anwendung einer Driftkorrektur zur Eliminierung von natürlich (Eigenpotentiale, Schumann Resonanzen) und anthropogen (z.B. oberirdischen Freileitungen, unterirdische Gas-, Strom- und (Ab-)Wasserleitungen, Bahnnetzleitungen) verursachten Störspannungen sowie linearen Driftspannungen,
- eine automatische selektive Stapelung zur Eliminierung von nichtstationären Störungen und zur Bestimmung der statistisch gemittelten Signalforn (Rekonstruktion der mittleren Signalforn),
- eine anschließende Kreuzkorrelation mit dem Stromreferenzsignal, da die exakte zeitliche Synchronisation der Datenaufnehmer meist nicht gegeben ist, zur Ermittlung der Phasenverschiebung sowie Korrektur (Verschiebung) des Spannungssignals und
- die Bestimmung des mittleren Spannungswertes ΔU und dessen Standardabweichung.

Mit der Signaldarstellung im Frequenzbereich $x(f)$ lassen sich physikalische Vorgänge mitunter einfacher beschreiben als durch Funktionen der Zeit $x(t)$. Für eine Datenbearbeitung im Frequenzbereich wird das Frequenzspektrum der Stromzeitreihe und der gemessenen Potentialzeitreihe unter Anwendung der Fourier-Transformation berechnet. Für die Fourier-Transformierte gilt:

$$\mathcal{F}\{x(t)\} = x(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-2\pi i f t} dt. \quad (2.15)$$

Das Frequenzspektrum ist eine komplexwertige Funktion. Ihr Betrag $|\mathcal{F}\{x(t)\}|$ bildet das Amplitudenspektrum, ihr Phasenwinkel ϕ das Phasen(winkel)spektrum. Rechtecksignale lassen sich mittels Fourier-Analyse in Trigonometrische Funktionen zerlegen (Fourier-Reihe). Ihre Zerlegung zeigt, dass symmetrische Rechtecksignale im Frequenzspektrum (Linienpektrum) nur ungerade ganzzahlige Vielfache einer Grundfrequenz f_0 erzeugen (Grundschiwingung/ 1. Harmonische f_0 , 3. Harmonische $3 \cdot f_0$, 5. Harmonische $5 \cdot f_0$, usw.). Eine Harmonische oberhalb der Grundfrequenz wird als Oberschiwingung bezeichnet. Rechteckschiwingungen mit hoher Flankensteilheit enthalten besonders viele Oberschiwingungen. Ihre Amplituden nehmen mit steigender Frequenz ab. Ist die Anzahl der Messwerte eine Potenz von zwei, so kann die schnelle Fourier-Transformation (engl.: *fast Fourier transform*, FFT) anstelle einer diskreten Fourier-Transformation angewandt werden (Butz, 2011). Aus den bestimmten Strom-

und Spannungsamplituden des Frequenzspektrums (Spektrallinien) kann der ohmsche Widerstand und mit Kenntnis der Geometriewerte letztendlich die Verteilung der scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstände bestimmt werden.

Inversionsverfahren rekonstruieren die reale Verteilung der spezifischen elektrischen Widerstände im Untergrund aus den aufgenommenen Messdaten. Moderne Inversionsverfahren basieren auf einem Gauß-Newton-Minimierungsalgorithmus. Die nötige Regularisierung erfolgt über Annahmen (smoothness constraints). Zur Diskretisierung werden Dreiecke (2D) und Tetraeder (3D) verwendet. Somit kann für beliebig geformte Gebiete ein Widerstandsmodell errechnet werden, aber auch vorab mit zusätzlichen Strukturinformationen (a-priori Informationen) aus der Seismik oder aus Bohrlöchern verknüpft werden.

In dieser Arbeit wird die **3D-Inversion** aller geoelektrischen Datensätze mit dem Boundless Electrical Resistivity Tomography Programmcode (BERT, www.resistivity.net) ausgeführt. Die Inversion mit BERT basiert auf einem 3-Gitter-Konzept mit einem Finite-Elemente (FE) Vorwärtsoperator (Rücker *et al.*, 2006) und einem Gauß-Newton-Minimierungsalgorithmus (Günther *et al.*, 2006). Die Diskretisierung des Messgebietes wird mit unregelmäßigen und unstrukturierten Tetraedern vorgenommen (FEM). Die einzelnen Inversionsschritte sind schematisch in Abbildung 2.3 (nach Günther *et al.*, 2006) zusammengefasst.

Zuerst werden auf Grundlage der Topographiekenntnisse und der Elektrodenanordnung die drei Netze (3-Gitter-Konzept) erstellt (Abb. 2.4):

- An die Topographie angepasst wird ein **Parametergitter** (engl.: *parameter mesh*) erzeugt (Parametrisierung des Messgebietes). Es ist das größte der drei Netze und definiert den Bereich für die Inversion.
- Zur Vermeidung von Grenzflächeneffekten während der Inversion wird das Parameternetz verfeinert und an den Rändern erweitert (Randprolongation). Dieses Netz wird **Sekundärfeldgitter** (engl.: *secondary mesh*) genannt. Auf ihm findet die Vorwärtsberechnung statt.
- Unter Kenntnis der Topographie und der Elektrodenanordnung wird das **Primärfeldgitter** (engl.: *primary mesh*) erstellt. Dieses Netz ist in Elektrodennähe sehr fein, während es mit zunehmender Entfernung zur Elektrode immer gröber wird. Auf dem Primärfeldnetz werden die primären Potentiale berechnet, die die Geometriefaktoren und folglich die scheinbaren spezifischen Widerstände bestimmen.

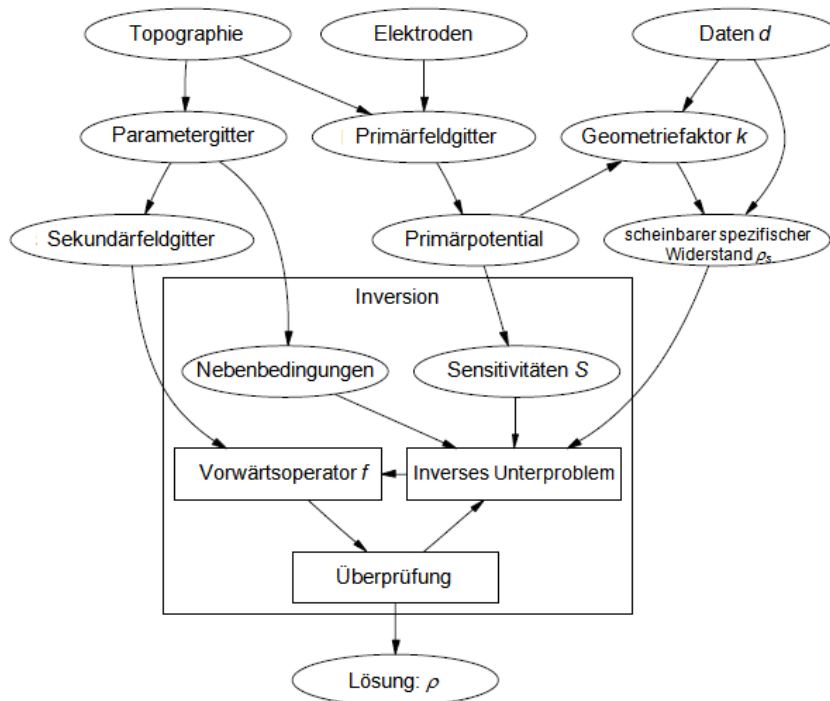


Abb. 2.3: Schematische Darstellung der einzelnen Inversionsschritte mit BERT nach Günther *et al.* (2006): Der Rechteckrahmen kennzeichnet die Hauptschleife der Vorwärtsberechnung und der Inversion, die solange ausgeführt wird, bis das Abbruchkriterium erreicht und eine Lösung gefunden wurde.

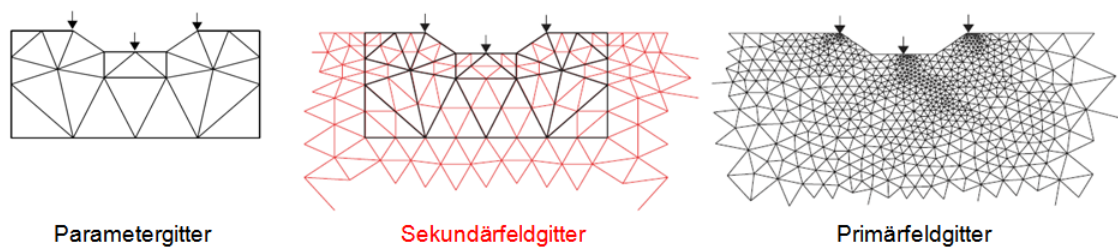


Abb. 2.4: Darstellung der drei Netze einer 2D-Diskretisierung mit BERT: Parametrigitter (schwarz, links), Sekundärfeldgitter (rot, mitte) und Primärfeldgitter (schwarz, rechts) nach Günther *et al.* (2006).

Nach der Gittererzeugung werden in der Vorwärtsmodellierung die elektrischen Potentiale auf dem Sekundärfeldnetz mittels FD-Methode berechnet. Die Zielsetzung der Inversion ist es, eine plausible Verteilung von Modellparametern \vec{m} zu finden, dessen Finite-Elemente-Vorwärtsoperator f die gemessenen Daten \vec{d} erklärt:

$$\vec{d} = f(\vec{m}). \quad (2.16)$$

In der Formulierung des inversen Problems ist der Vorwärtsoperator f dabei im Wesentlichen eine partielle Differentialgleichung, der die physikalischen und geometrischen Abhängigkeiten beschreibt.

Da es sich um ein nicht-lineares Problem (f hängt im Beispiel der Geoelektrik von \vec{m} ab) handelt, können die gesuchten Modellparameter \vec{m} nicht aus $f^{-1}(\vec{d})$ abgeschätzt werden. Von einem geeigneten Startmodell m^0 mit dem Iterationsschritt $k=0$ ausgehend, wird in der Vorwärtsberechnung der Modellparameter so lange iterativ geändert und mit den gemessenen Daten abgeglichen, bis beide Parameter übereinstimmen oder der Anpassungsprozess stagniert (Konvergenz). In jedem Iterationsschritt k wird durch Addition einer Modellaktualisierung Δm^k ein neues Modell m^{k+1} erzeugt. Es gelten:

$$m^{k+1} = m^k + \Delta m^k \quad \text{und} \quad f(m^{k+1}) = d. \quad (2.17)$$

Ist eine Funktion genügend oft differenzierbar, so kann sie durch ein Polynom n -ter Ordnung approximiert werden (Taylorreihenentwicklung). Somit lassen sich nicht-lineare Probleme linearisieren und lösen. Wird die Funktion $f(m^{k+1})$ an der Stelle m^k in eine Taylorreihe bis zur ersten Ordnung entwickelt, ergibt sich:

$$f(m^{k+1}) \approx f(m^k) + \frac{\partial f(m^k)}{\partial m} (m^{k+1} - m^k). \quad (2.18)$$

Aus Gleichung (2.17) folgt weiter:

$$f(m^k + \Delta m^k) \approx f(m^k) + \frac{\partial f(m^k)}{\partial m} \Delta m^k = f(m^k) + S \Delta m^k, \quad (2.19)$$

wobei $\frac{\partial f(\vec{m})}{\partial m} = S$ die Jakobi-Matrix (Sensitivitätsmatrix) mit $S_{ij}(m^k) = \frac{\partial f_i(m^k)}{\partial m_j}$ darstellt.

Neben der Sensitivätsberechnung werden die Konfigurationsfaktoren zur Berechnung der scheinbaren spezifischen Widerstände bestimmt.

Aus Gleichung (2.17) und (2.19) ergibt sich eine lineare Näherung:

$$S \Delta m^k = d - f(m^k), \quad (2.20)$$

die im Grunde mit dem numerischen Gauß-Newton-Verfahren durch die Minimierung des Residuums $d - f(m^k)$ gelöst werden kann. Für jeden Datenpunkt d_i existiert ein Fehler ϵ_i , der zur Bewertung und Wichtung des Residuums benutzt wird. Unter Verwendung einer L^p -Norm ist die Datenfunktion ϕ_d , die es zu minimieren gilt, definiert als:

$$\phi_d(m) = \sum_{i=1}^N \left| \frac{d_i - f_i(m)}{\epsilon_i} \right|^p = \|D(d - f(m))\|_p^p \rightarrow \min. \quad (2.21)$$

Die L^p -Norm ist dabei eine Norm auf dem Raum der p -integrierbaren Funktionen (Lebesgue-Raum). Da es sich hier um Gaußsches Rauschen handelt, wird die L^2 -Norm (Methode der kleinsten Quadrate) zur Lösung (im Hilbertraum) verwendet. Da die Minimierung der Datenfunktion ϕ_d ein schlecht gestelltes Problem darstellt, wird eine Regularisierung mittels einer zusätzlichen Modellfunktion (Stabilisierungsfunktion) $\phi_m(m)$ eingeführt. Für diese gilt:

$$\phi_m(m) = \|C(m - m^0)\|_2^2. \quad (2.22)$$

Gewichtet wird die Modellfunktion durch den Regularisierungsparameter λ . Für eine globale Regularisierung ergibt sich die zu minimierende Gesamtfunktion $\Phi(m)$ mit den Modell- und Datenrandbedingungsmatrizen C und D zu:

$$\phi(m) = \phi_d(m) + \lambda \cdot \phi_m(m) = \|D(d - f(m))\|_2^2 + \lambda \|C(m - m^0)\|_2^2 \rightarrow \min, \quad (2.23)$$

wobei C die Beschränkungsmatrix (engl.: *constraint matrix*) und D die Datenwichtungsmatrix (engl.: *data weighted matrix*) ist. Die Lösungen werden umso glatter, je größer λ gewählt wird (Annahme eines glatten Modells/ smoothness constraints). Die Regularisierung beschreibt einen Kompromiss zwischen der Abbildungstreue und den Rauschartefakten. Für die Bestimmung der optimalen Lösung erfolgt die Wahl der optimalen Regularisierung λ_{opt} anhand von subjektiven (minimaler Abstand zum Koordinatenursprung; L-Kurven-Methode) oder optischen (Punkt maximaler Krümmung) Kriterien (siehe Abb. A.2). Ziel einer objektiven Bestimmung von λ_{opt} ist es, einen Kompromiss zwischen einer möglichst guten Anpassung an die Daten und einer Einhaltung der Zusatzforderungen zu finden.

Für eine lokale Regularisierung wird bei der Datenanpassung typischerweise der Wert von $d - f(m)$ oder $\chi^2 = \phi_d/N$ (mit N als Anzahl der Datenpunkte) verwendet, um den durchgeführten Minimierungsschritt des Gauß-Newton-Verfahrens beurteilen zu können. Es ist ein Maß für die gewichtete Abweichung des Modells von den gemessenen Daten. Bei einer idealen Anpassung der Daten innerhalb ihrer Fehler gilt $\chi^2 \approx 1 - 5$

(Günther *et al.*, 2006). Die Näherung liegt nahe bei der Lösung, während das Residuum klein ist.

2.1.5 Kurze Einführung in die petrophysikalischen Eigenschaften

In diesem Kapitel werden die petrophysikalischen Eigenschaften von Gesteinen anhand der gemessenen physikalischen Größe elektrische Leitfähigkeit beschrieben und ihr Zusammenhang mit verschiedenen lagerstättenkundlich relevanten Größen gegeben.

Gesteine sind komplexe Systeme und bestehen aus drei Komponenten:

- der Gesteinsmatrix (Festgesteinsanteil aus mehreren Mineralkomponenten)
- dem fluidgefülltem Porenraum und
- der dazugehörigen Grenzfläche zwischen Gesteinsmatrix und dem Porenfluid (Porenflüssigkeit).

Da die meisten gesteinsbildenden Minerale (Nichtmetalle) sehr hohe spezifische elektrische Widerstände ($> 10^8 \Omega\text{m}$) aufweisen, werden sie als Isolatoren (Dielektrikum) bezeichnet. Zu den leitenden Mineralen gehören beispielsweise Sulfide und einige Oxide ($10^{-6} - 10^{11} \Omega\text{m}$), Metallerze und Graphit ($10^{-8} - 10^{-5} \Omega\text{m}$). Sie sind relativ selten in der Erdkruste (Just, 2001). Somit hat die elektrolytische Leitfähigkeit der Poren- und Kluftwässer (Porenfluide) einen entscheidenden Einfluss auf die Gesamtleitfähigkeit der Gesteine. Die spezifischen Widerstände trockener Gesteine sind somit sehr hoch (siehe Tab. 2.1).

Die elektrische Leitfähigkeit der Gesteine σ und somit auch der spezifische elektrische Widerstand (Gleichung 2.5) setzt sich aus der Leitfähigkeit der Gesteinsmatrix σ_{Matrix} , der elektrolytischen Leitfähigkeit der Porenflüssigkeit σ_w und der Grenzflächenleitfähigkeit σ_{Grfl} an der Grenze der Gesteinsmatrix zur Porenflüssigkeit zusammen:

$$\sigma = \sigma_{Matrix} + \sigma_w + \sigma_{Grfl}. \quad (2.24)$$

Gesteine mit vorrangiger elektrolytischer Leitfähigkeit σ_o (voll gesättigt, Sättigungsgrad $S_w = 1$, tonfreies Gestein) hängen somit von der elektrolytischen Leitfähigkeit des Porenfluids σ_w und der Porosität ϕ ab. Der Ladungstransport findet über die Ionen der im Porenfluid gelösten Salze statt. Die 1. Archie-Gleichung beschreibt diesen Zusammenhang über den Formationsfaktor F :

$$F = \frac{\rho_o}{\rho_w} = \frac{\sigma_w}{\sigma_o} = a\phi^{-m}, \quad (2.25)$$

wobei m der Zementationsexponent (1,3 für unverfestigte Sande und 2,4 für sehr stark verfestigte Sandsteine und Karbonate; $1,3 < m < 2,4$) und a ein Proportionalitätsfaktor ($a = 1$ nach Archie (1942); 0,6 für Sande; $0,5 < a < 1$ nach Schön (1983)) ist.

Ist der Porenraum des Gesteins nur teilgesättigt und befinden sich außer dem Porenfluid noch Gase darin, so hängt der spezifische elektrische Widerstand ρ_t der teilgesättigten Probe (bzw. die elektrische Leitfähigkeit σ_t) zusätzlich von der räumlichen Verteilung und Bindung im Porensystem ab. Die 2. Archie-Gleichung beschreibt diesen Zusammenhang über den Sättigungsgrad S_w ($0 < S_w < 1$, da teilgesättigt) und den Sättigungsexponenten n (meist 2; $1 < n < 2$):

$$\rho_t = \rho_w a \phi^{-m} S_w^{-n} \quad \text{bzw.} \quad \sigma_t = \sigma_w a^{-1} \phi^m S_w^n. \quad (2.26)$$

Die elektrische Leitfähigkeit σ von Gesteinen mit hohem Anteil an Tonmineralen hängt zusätzlich von der Grenzflächenleitfähigkeit σ_{Grfl} ab. Auch bei nicht-leitender Porenfüllung und Gesteinsmatrix existiert durch den Anteil an Tonminerale eine Restleitfähigkeit des Gesteins. Es gilt:

$$\sigma = \sigma_w a^{-1} \phi^m S_w^n + \sigma_{Grfl}. \quad (2.27)$$

Die Ursache liegt in der Konzentration von Kationen an der Tonmineraloberfläche (Kationenaustauschvermögen der Tone). Die Leitfähigkeit entsteht aufgrund der Wechselwirkung des Porenfluides mit der Gesteinsmatrix (Tonanteil). Es bildet sich eine elektrische Doppelschicht an der Grenze der Gesteinsmatrix zur Porenflüssigkeit aus. Es fließt ein elektrischer Strom.

Es wird zusammengefasst, dass die elektrische Leitfähigkeit eines Gesteins bei geoelektrischen Messungen im Labor und im Gelände u.a. von folgenden Einflussgrößen abhängt (Knödel *et al.*, 2005):

- Messfrequenz
- Temperatur- und Druckbedingungen unter Labor- bzw. in-situ-Bedingungen
- Porosität
- Sättigungsgrad des Porenraums
- Porenraumbildung und Porenraumverteilung
- Kornverband und Korngröße.

Die Gesamtporosität ϕ umfasst alle mit Gasen oder Flüssigkeiten gefüllte Hohlräume in einem Gestein. Sie beschreibt das Verhältnis vom Hohlraumvolumen zum Gesamtvolumen eines Stoffes oder Stoffgemisches. Typische Werte für einen porösen

Sandstein liegen bei rund 30 % und sind abhängig von seiner Korngrößenverteilung (Gesteinsart), seiner Art des Bindemittels (Porenfüllung) und seiner Verfestigung (Konsolidierung). Die Porosität spielt bei der Bewertung von Lagerstätten eine wichtige Rolle. Während Lagerstätten mit Porositäten kleiner als 4 % für eine Nutzung vernachlässigbar sind, können Lagerstätten mit Porositäten von über 20 % als ausgezeichnet beschrieben werden.

2.2 Kurze Einführung in die CO₂-Speicherung

Die chemische Verbindung CO₂ ist unter Normalbedingungen ($\vartheta = 0\text{ °C}$ und $p = 1,013\text{ bar}$) ein unbrennbares, farb- und geruchloses Gas, das sich gut in Wasser löst, und als wichtiges Treibhausgas ein natürlicher Bestandteil der Atmosphäre. Im Jahr 2013 lag die mittlere CO₂-Konzentration in der Atmosphäre bei rund 400 ppm und damit deutlich über dem vorindustriellen Niveau von rund 280 ppm (Howard, 2014).

Der zwischenstaatliche Ausschuss für Klimaveränderungen IPCC (Intergovernmental Panel of Climate Change) beurteilt die Risiken der globalen Erwärmung aufgrund der Zunahme der globalen CO₂-Emission. Eine Zunahme der CO₂-Konzentration bedeutet eine Zunahme des natürlichen Treibhauseffekts und damit eine Verstärkung der globalen Erwärmung. Der IPCC trägt Vermeidungs- und Anpassungsstrategien in seinen Sachstands- und Sonderberichten zusammen (Liebscher *et al.*, 2012). Als eine potentielle Maßnahme zur Reduktion der anthropogenen Treibhausgasemission kommt dabei die Technologie zur Abscheidung und Speicherung von CO₂ im tiefen geologischen Untergrund (engl.: *carbon dioxide capture and storage*, CCS) in Betracht (IPCC, 2005). Aus diesem Grund wird beispielsweise erforscht, unter welchen Bedingungen die CO₂-Speicherung in geologischen Formationen langfristig und ohne Gefährdung von Mensch und Umwelt möglich ist. Erst dann sind großmaßstäbliche und damit klimarelevante Umsetzungen der CCS Technologie möglich (Liebscher *et al.*, 2012).

CO₂ liegt abhängig von Temperatur und Druck in unterschiedlichen Aggregatzuständen vor: man unterscheidet die Phasen fest, gasförmig, flüssig und superkritisch (auch überkritisch). Abbildung 2.5 zeigt schematisch die einzelnen Phasen von Kohlendioxid bei unterschiedlichen Druck- und Temperaturbedingungen. Als superkritisches Fluid liegt CO₂ in seiner dichtesten Phase vor und benötigt wesentlich weniger Porenvolumen als seine Gasphase. Für eine Speicherung von beispielsweise 1 t CO₂ unter Oberflächenbedingungen von 0 °C und 1 bar (gasförmig, $\rho_{\text{Gas}} = 1,98\text{ kg/m}^3$) würde ein Porenvolumen von rund 500 m³ gebraucht, während für die gleiche Speichermenge in

einer Tiefe von rund 1.000 m unter Reservoirbedingungen von 35 °C und 102 bar (superkritisch, $\rho_{\text{superkritisches Fluid}} = 705 \text{ kg/m}^3$) lediglich ein Porenvolumen von rund 1,4 m³ nötig wäre (Bentham & Kirby, 2005).

Weltweit existieren zahlreiche künstlich angelegte und sogenannte natürliche CO₂-Speicher unterschiedlicher Größe (Kühn, 2011). Bei der künstlichen CO₂-Speicherung wird CO₂ in geeignete geologische Gesteinsformationen injiziert. Man unterscheidet künstlich angelegte CO₂-Speicher nach ihrem Standort

- an Land (engl.: *onshore*) und
- unter dem Meeresboden (engl.: *offshore*),

sowie hinsichtlich ihrer Nutzung

- zur Reduktion von CO₂-Emissionen in die Atmosphäre durch die technische Abspaltung am Kraftwerk (CO₂-Abscheidung) und Einlagerung in unterirdische Lagerstätten (CO₂-Speicherung),
- zur verbesserten Erdölgewinnung stark ausgeförderter Erdöllagerstätten (engl.: *Enhanced Oil Recovery, EOR*),
- zur verbesserten Erdgasgewinnung stark ausgeförderter Erdgaslagerstätten (engl.: *Enhanced Gas Recovery, EGR*) und
- zur verbesserten Förderung von natürlich gespeichertem Methan aus tiefen, stark ausgeförderter Kohleflözen (engl.: *Enhanced Coal Bed Methane recovery, ECBM*) aufgrund ihrer Verdrängung (von Erdöl, Erdgas oder Methan) durch injiziertes CO₂ in die jeweilige Lagerstätte (Ginzky & Hahlbeck, 2008).

Die unterirdische, geologische CO₂-Speicherung ist keine Erfindung des Menschen, sondern ein ganz natürliches Phänomen. Weltweit existieren zahlreiche natürliche CO₂-Lagerstätten (Kühn, 2011). Sie entstehen beispielsweise bei der Ansammlung von aufsteigendem CO₂ in geologischen Fallen (analog zur Entstehung einer Erdgaslagerstätte mit aufsteigendem Erdgas) oder bei der Festsetzung als CO₂-Hydrat im Meeresboden aufgrund vulkanischer Aktivitäten (Ginzky & Hahlbeck, 2008). Technisch ist für uns die künstliche CO₂-Speicherung in geologischen Fallen interessant.

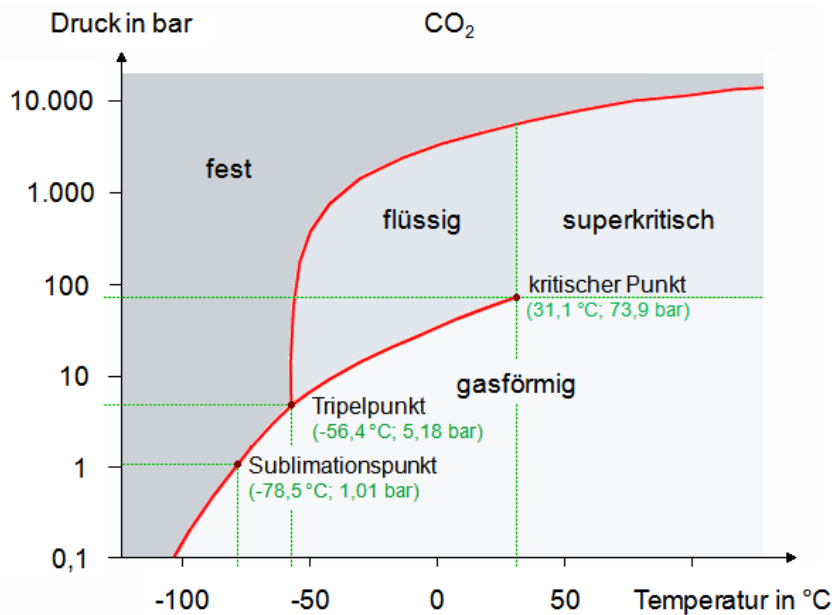


Abb. 2.5: Druck-Temperatur-Phasendiagramm von CO₂. Es kann vier Aggregatzustände einnehmen: fest, flüssig, gasförmig und superkritisch (nach Atkins & de Paula, 2013).

Bei geologischen Fallen unterscheidet man nach Press & Siever (1995) zwischen verschiedenen Typen:

- strukturelle (tektonische) Fallen: Bildung durch Bewegung der Gesteinsschichten (Entstehung von Verwerfungen)
- stratigraphische Fallen: Entstehung durch die Altersfolge der Gesteinsschichten
- Sattel- oder Antiklinalstrukturen
- Fallen an einem Salzstock.

Als Speichergestein werden Gesteinsformationen bezeichnet, die für die CO₂-Aufnahme und CO₂-Speicherung ausreichend porös und durchlässig (permeabel) sind. Darüber liegende gering-permeable Gesteinsschichten bilden das Deckgebirge und dienen als geologische Barriere gegen Fluid- und Gasbewegungen aus dem Speichergestein (Kühn, 2011).

Zur langfristigen und sicheren CO₂-Speicherung bieten sich technologisch momentan drei Speicheroptionen nach Kühn (2011) und Friedmann (2007) an:

- tiefliegende, salzwasserführende Grundwasserleiter (saline Aquifere),
- ausgeförderte Erdöl- und Erdgaslagerstätten, sowie
- tiefliegende, derzeit nicht förderbare Kohleflöze.

Die weltweite CO₂-Aufnahmekapazität dieser drei wichtigsten geologischen Speichermöglichkeiten wird zusammen auf mindestens 2.000 Gigatonnen CO₂ und optimistisch auf bis zu 11.000 Gt CO₂ geschätzt (ICPP, 2005). Im Vergleich dazu betrugen die energiebedingten CO₂-Emissionen im Jahr 2013 weltweit 35,1 Gt CO₂, für Deutschland im gleichen Jahr 0,84 Gt CO₂ (IWR, 2014). Es existiert somit theoretisch eine globale CO₂-Speicherkapazität von mindestens 50 bis 60 Jahren für die gesamte weltweit energiebedingte CO₂-Emission.

Als weltweit wichtigste CO₂-Speicher werden die salinen Aquifere angesehen (IPCC, 2005), da die Speicherkapazität in ausgeförderte Erdöl- und Erdgaslagerstätten, sowie besonders in nicht abbauwürdigen Kohleflözen stark begrenzt ist. Abschätzungen für eine weltweite CO₂-Speicherkapazität ergaben für saline Aquifere 1.000 bis 10.000 Gt CO₂, während sie für ausgeförderte Erdöl- und Erdgasfelder bei 675 bis 900 Gt CO₂ und für nicht förderbare Kohleflöze bei lediglich bis zu 200 Gt CO₂ lagen (ICPP, 2005). Saline Aquifere kommen sehr häufig und fast überall vor. Damit können Transportwege und Transportkosten gering gehalten werden (Lagneau *et al.*, 2005). Die CO₂-Speicherkapazität in salinen Aquiferen wird für Deutschland fortlaufend abgeschätzt und konkretisiert. Knopf *et al.* (2010) beziffern die Speicherkapazität dort auf 6,3 bis 12,8 Gt CO₂. Das größte Speicherpotential liegt dabei in Norddeutschland. Saline Aquifere sind wirtschaftlich uninteressant, da durch den hohen Salzgehalt keine Trinkwassernutzung möglich ist (Lagneau *et al.*, 2005). Saline Aquifere sind vor allem Sandsteine (Kühn, 2011). Sandstein besteht vorwiegend aus Quarz, der im Gegensatz zu anderen Mineralen sehr beständig ist und kaum durch CO₂-reiche Lösungen aufgelöst wird (Ginzky & Hahlbeck, 2008).

Die folgende Diskussion zur geologischen Machbarkeit der künstlichen CO₂-Speicherung, seiner Risiken und natürlichen Rückhaltemechanismen beschränkt sich auf die vielversprechende Speicheroption der salinen Aquifere.

Natürliche vorkommende CO₂-Lagerstätten belegen, dass für geologisch lange Zeiträume CO₂ vom Speichergestein aufgenommen und vom Deckgebirge effizient zurückgehalten werden kann. Damit ist die prinzipielle Machbarkeit einer langfristigen (Zeitskala von etwa tausend Jahren) und sicheren künstlichen CO₂-Speicherung im Untergrund gegeben (Kühn, 2011).

Risiken bei der CO₂-Speicherung sind künstliche und natürliche Leckagen. Aktive oder bereits stillgelegte Bohrungen sind potentielle Migrationswege für das injizierte CO₂, da eingebrachte künstliche Materialien (Verrohrung und Zementierung) langfristig korrodieren können. Geologische Klüfte und Störungen dienen als natürliche Fließpfade

für CO₂-Leckagen. Weiter muss bei der CO₂-Speicherung sichergestellt sein, dass gegebenenfalls das durch das CO₂ verdrängte Salzwasser des Speichergesteins nicht über Migrationspfade die oberflächennahen, nutzbaren Grundwasservorkommen versalzt (Salzwasserverlagerung; Kühn, 2011).

Physikalische und chemische Rückhaltemechanismen sorgen dafür, dass das CO₂ im Speichergestein verbleibt, mit der Zeit immer stärker ans Gestein gebunden wird und nicht wieder an die Erdoberfläche aufsteigt. Sie erhöhen die Effizienz und Sicherheit der Speicherung in salinen Aquiferen. Mit der Zeit nimmt also die Wahrscheinlichkeit einer Leckage ab. Für saline Aquifere unterscheidet man vier Rückhaltemechanismen im Laufe der Speicherzeit (Kühn, 2011; IPCC, 2005):

- Strukturelle, physikalische CO₂-Rückhaltung unterhalb des Deckgebirges: während und direkt nach der Injektion steigt das superkritische bzw. gasförmige CO₂ aufgrund seiner geringeren Dichte ($\rho_{\text{superkritisch}} \sim 260$ bis 900 kg/m^3 bzw. $\rho_{\text{gasförmig}} \sim 1 \text{ kg/m}^3$) gegenüber der des Formationswassers ($\rho_{\text{flüssig}} \sim 1.000 \text{ kg/m}^3$) im Reservoir auf und sammelt sich unterhalb der undurchlässigen Deckschicht (Barrieregestein) aus Ton- oder Salzgesteinen im oberen Reservoirbereich
- Kapillare, physikalische CO₂-Rückhaltung durch Bindung in kleinen Poren: in kleinen, engen Porenräumen des Speichergesteins kann das gasförmige CO₂ trotz Dichtedifferenz zum Umgebungswasser aufgrund der Kapillarkräfte nicht weiter innerhalb der Deckschicht aufsteigen
- Lösung von CO₂ in Wasser (chemische Lösungsrückhaltung): mit der Zeit liegt ein Großteil des gasförmigen CO₂ gelöst im Formationswasser vor und bildet Kohlensäure (CO₂ liegt in keiner eigenen Phase mehr vor), und sinkt dann aufgrund der etwas höheren Dichte gegenüber der des Formationswassers tendenziell wieder ab
- Mineralische CO₂-Rückhaltung (chemische Mineralausfällung): das gelöste CO₂ (Kohlensäure) wird durch die Mineralisierung in Form von Calcit zu einer festen Ablagerung im Gestein und damit dauerhaft gebunden.

Nur superkritisches und gasförmiges CO₂ erfährt im Reservoir generell eine Auftriebskraft und könnte daher als gasförmiges CO₂ aus dem Speicher entlang von tektonischen Störzonen migrieren. Mit der Zeit löst sich das superkritische und gasförmige CO₂ im Formationswasser und ist nicht mehr als freies Gas vorhanden. Ein geringer Teil wird langfristig mineralisiert und somit ans Gestein gebunden. Die natürlichen Rückhaltemechanismen verhindern ein Entweichen des CO₂ aus dem salinen Aquifer.

Sind folgende Voraussetzungen für die CO₂-Injektion und CO₂-Speicherung gegeben, sind saline Aquifere als CO₂-Speicheroption geeignet (Bentham & Kirby, 2005):

- Ein großes Porenvolumen des Aquifers (ausreichend große Porosität) begünstigt eine genügende Kapazität des Speichers, um CO₂ aufnehmen zu können.
- Eine ausreichend große Permeabilität bedingt einen geringeren Fluiddruck am Injektionspunkt (aufgrund der Porenfluidverdrängung durch das injizierte CO₂) und damit eine hohe injizierbare CO₂-Rate und CO₂-Speichermenge.
- Eine große Speichertiefe bedeutet, dass das CO₂ (aufgrund von Druck und Temperatur) in seiner superkritischen Phase vorliegt und somit weniger Speichervolumen benötigt.

2.3 Methoden zur Überwachung der CO₂-Speicherung

Um eine langfristige und sichere CO₂-Speicherung zu gewährleisten, sind geeignete Methoden zur Überwachung (engl.: *monitoring*) des gesamten Speicherprozesses notwendig. So können Aussagen zur CO₂-Ausbreitung im Speichergestein (Reservoir), zu dessen Dichtheit und Langzeitsicherheit gemacht und eine Risikobewertung vorgenommen werden.

Zur besseren Einschätzung der Methodeneignung werden wissenschaftliche Erkenntnisse aus geoelektrischen Messbeispielen aus der großskaligen Tiefengeoelektrik zur Prozessbeobachtung und Strukturerkundung herangezogen (Kap. 2.3.1).

Im anschließenden Unterkapitel (Kap. 2.3.2) werden ausgewählte Beispiele weltweiter wissenschaftlicher (< 1 Mt CO₂/ Jahr) und kommerzieller (> 1 Mt CO₂/ Jahr, Einteilung nach Michael *et al.*, 2010) CO₂-Speicherprojekte und die dort angewandten Methoden zur Überwachung der CO₂-Speicherung in Form einer Literaturrecherche aufgeführt. An den kommerziell genutzten CO₂-Speicherstandorten wie beispielsweise Sleipner (Norwegen), In Salah (Algerien), Snøhvit (Norwegen) oder Weyburn (Kanada) wurden bisher vor allem seismische Verfahren zur Überwachung des CO₂-Speicherprozesses angewandt (White, 2013; Eiken *et al.*, 2011).

Eine zentrale wissenschaftliche Fragestellung im Untersuchungsprogramm am Pilotstandort Ketzin und somit dieser Dissertation war es daher, inwieweit geoelektrische Verfahren im Bohrloch zur Überwachung der CO₂-Speicherung eingesetzt und wie gut die CO₂-Ausbreitung im Vergleich zu klassischen Monitoring-Methoden abgebildet werden kann.

Es werden die Machbarkeit und das Potential speziell der geoelektrischen Überwachung anhand von Modellstudien und Laboruntersuchungen aufgezeigt, sowie Beispiele für CO₂-Speicherstandorte vorgestellt, die geoelektrische Überwachungsverfahren nutzen, und hinsichtlich ihrer Eignung als Überwachungsmethode für die CO₂-Speicherung bewertet (Kap. 2.3.3).

Abschließend werden erhoffte und erwartete Vor- und Nachteile der Geoelektrik als Methode zur Überwachung der CO₂-Speicherung am Pilotstandort Ketzin abgeleitet und zusammengefasst (Kap. 2.3.4).

2.3.1 Kurze Einführung in die großskalige Tiefengeoelektrik

Geoelektrische Messungen lassen sich hinsichtlich ihrer Aufstellungsweite in kleinskalige, mesoskalige und großskalige Anwendungen unterteilen. Kleinskalige und mesoskaligen Anordnungen werden beispielsweise bei hydrogeologischen und archäologischen Fragestellungen, bei Baugrunduntersuchungen oder Mülldeponie-erkundungen (Messungen von der Oberfläche aus) sowie in der Bohrlochgeophysik eingesetzt. Sie spielen zur Hohlraum- und Klufterkundung eine Rolle.

Im Gegensatz dazu werden für großräumige strukturelle Erkundungen und in der Prozessbeobachtung vorrangig großskalige Anwendungen im Kilometer-Bereich eingesetzt. Geoelektrische Prozessbeobachtungen umfassen viele hydrogeologische Fragestellungen, beispielsweise die Überwachung der Grundwasserströmung, die Beobachtung des Schadstoffaustrages sowie die Überwachung von Tracer- und anderen Injektionsexperimenten (Carrigan *et al.*, 2009).

Es existieren zahlreiche Studien über erfolgreich durchgeführte geoelektrische Erkundungen mit Gleichstromverfahren. Beispiele dafür sind u.a. geoelektrische Oberflächen-Erkundungen mit Wenner-Anordnungen (z.B. Revil *et al.*, 2004), Pol-Pol-Anordnungen (z.B. Li & Oldenburg, 1994) oder Dipol-Dipol-Anordnungen (z.B. Daily *et al.*, 1992). Für große Erkundungstiefen stößt man mit Schlumberger-Sondierungen aufgrund der großen Kabelauslagen schnell an logistische Grenzen. Als guter Kompromiss zwischen den Abbildungseigenschaften und dem Aufwand beim Feldexperiment hat sich daher die Dipol-Dipol-Anordnung bewährt (Kap. 2.1.3).

Im Folgenden werden ausgewählte Beispiele großskaliger geoelektrischer DC Oberflächen-Oberflächen-Messungen mit einer Dipol-Dipol-Standard-Elektrodenkonfiguration (CCPP) als Expertise der Universität Leipzig zusammengefasst. Dabei erfolgte die Stromeinspeisung und Potentialmessung über Oberflächendipole

begrenzter Länge, allerdings mit Abständen bis zu mehreren Kilometern. Die tiefengeoelektrischen Signale wurden als kontinuierliche Zeitreihen mithilfe von Datenloggern aufgezeichnet.

Brunner *et al.* (1999) nutzten die elektrische Widerstandstomographie zur strukturellen Erkundung eines tertiären Maars in Baruth (Deutschland). Das erlaubte die Festlegung einer optimalen Bohrlochlokation für paläoklimatologische Untersuchungen.

Ferner nutzten Storz *et al.* (2000) dieses Verfahren zur strukturellen Erkundung und der tektonischen Beschreibung der Umgebung der Kontinentalen Tiefbohrung (KTB) in Windischeschenbach (Deutschland).

Brunner (2001) und Friedel (2000) untersuchten die Flanken des aktiven Vulkans Merapi (Indonesien) mithilfe von Profil-Messungen. Anhand der Veränderung elektrischer Gesteinseigenschaften in unmittelbarer Vulkannähe sollte die zeitliche Entwicklung der Vulkanaktivität und sein struktureller Aufbau untersucht werden. Die gewonnenen Ergebnisse entlang der untersuchten Vulkanflanken erklärten den Übergang zum hydrothermal aktiven Bereich des Vulkans. Folglich sind kontinuierliche geoelektrische Überwachungen der aktiven vulkanischen Zonen im Untergrund vielversprechend bezüglich einer Möglichkeit eines Frühwarnsystems.

Flehsig *et al.* (2010) lieferten einen Ansatz zur strukturellen Bewertung der oberflächennahen Leitfähigkeitsverteilung im Egerbecken (Tschechien). Anhand einzelner Dipol-Dipol-Aufstellungen (CCPP) wurde die Signalqualität bei großen Dipolabständen bis 15 km untersucht. Über den Inversionsansatz mit dem Programmcode BERT und der Möglichkeit der Berücksichtigung geologischer a-priori Informationen entstand ein strukturelles Abbild des Egerbeckens bis zu einer Erkundungstiefe von 4 bis 5 km. Das erbrachte den Beweis der Anwendbarkeit und des Potentials großskaliger geoelektrischer Messungen für Untersuchungen von Transportprozessen im Egerbecken.

Schütze *et al.* (2010) erkundeten das Zentralböhmisches Scherzonensystem im Umfeld einer Forschungsbohrung in Rittsteig (Deutschland) zur Bestimmung eines geologischen Strukturmodells bis zu einer Tiefe von 350 m. Die Messungen wurden bereits 1998 auf gekreuzten Profilen durchgeführt. Die (2009 neu aufbereiteten) Ergebnisse lieferten über den Inversionsansatz mit BERT ein strukturelles Abbild des Scherzonensystems. Das erlaubte die Bestätigung der bereits bestehenden geologischen Modelle zur Lage und Tiefenausdehnung der graphitisierten Störungszonen.

Im Gegensatz zu den bisherigen Beispielen zur strukturellen Erkundung nutzten Schütze & Flechsig (2002) und Pribnow *et al.* (2003) die Widerstandstomographie zur Prozessbeobachtung. Sie untersuchten die Transportprozesse des aktiven Hydrothermalsystems in der Long Valley Caldera (LVC, Kalifornien, USA). Es wurden Messungen auf einem 21 km langen Profil über den Vulkankrater hinweg mit einer Erkundungstiefe von 4 bis 6 km durchgeführt. Die geoelektrischen Untersuchungen lieferten wichtige Informationen über das aktive Hydrothermalsystem der LVC und dessen Fluidverhalten. Tektonische Störungen bildeten hier Transportpfade für hydrothermale Wässer. Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse verspricht man sich von der großskaligen Geoelektrik weitere Anwendungsfelder bei der Prozessbeobachtung im tiefen geologischen Untergrund.

Mit der Nutzung versenkter Elektroden (geoelektrische Oberflächen-Bohrloch-Messungen) kann das Auflösungsvermögen gegenüber geoelektrischer Oberflächen-Oberflächen-Messungen wesentlich erhöht werden (Knödel *et al.*, 2005). Traditionell werden geoelektrische Oberflächen-Bohrloch-Messungen als „Methode des geladenen Körpers“ (Mise-à-la-Masse) mittels einer Pol-Pol-Elektrodenkonfiguration angewandt (z.B. Bevc & Morrison, 1991). Allerdings lässt sich diese Anordnung im urbanen Gelände aufgrund vorhandener Störeinflüsse (unterirdische Leitungen, Metallzäune etc.) und umfangreicher Bebauungen kaum realisieren. Alternativ bieten die Dipol-Dipol-Anordnungen Ergebnisse ähnlich guter Auflösung (Marescot *et al.*, 2002).

Laaß *et al.* (2006) nutzten die Widerstandstomographie für Untersuchungen der Transportprozesse in den Störzonen der Umgebung um die Kontinentale Tiefbohrung in Windischeschenbach (Deutschland). In die Bohrung wurde ein Vertikalelektroden-system (Voigt, 2002) eingefahren. Es befanden sich fünf Elektroden in Tiefen von 3.850 bis 4.000 m. Die Messungen lieferten Ergebnisse zur Ausbreitungsrichtung der Fluidbewegung nach der Durchführung eines hydraulischen Pumptestes (2002 bis 2003, Fördermenge von 22.300 m³ Salzwasser) und nach einem hydraulischen Injektionstest (2004 bis 2005, Injektion von 84.500 m³ Frischwasser).

Das lässt erwarten, dass sich großskalige geoelektrische Messungen an der Erdoberfläche und kombiniert an der Erdoberfläche und im Bohrloch besonders zur Überwachung von Stofftransporten oder Fluidbewegungen im geologischen Untergrund eignen. Man verspricht sich neben der Abbildung der Ausbreitungsfront auch eine Bestimmung bevorzugter Ausbreitungsrichtungen.

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass großskalige tiefengeoelektrische Messungen zur vollständigen Überwachung der CO₂-Speicherung im Untergrund von Ketzin in Raum

und Zeit sowie für eine Erweiterung des Beobachtungsraumes aus den geoelektrischen Bohrlochmessungen vielversprechend erscheinen.

2.3.2 Weltweite CO₂-Speicherprojekte und angewandte Methoden zur Überwachung

Weltweit werden bei zahlreichen wissenschaftlichen und kommerziellen CO₂-Speicherprojekten verschiedenste Methoden zur Überwachung des Speicherprozesses angewandt.

Anhand Abbildung 2.6 und Tabelle 2.3 soll ausschließlich ein Einblick in eine Auswahl laufender und stillgelegter Anlagen zur CO₂-Speicherung gegeben werden. Neben den CO₂-Speicherstandorten sind die CO₂-Speicherart, die ungefähre CO₂-Injektionstiefe und Speichermächtigkeit (Dicke des Speichergesteins), sowie Porosität, Permeabilität, Temperatur und Druck des CO₂-Speichers zusammengefasst. Es werden Referenzen zu den Überwachungsmethoden für den jeweiligen CO₂-Speicherstandort angeführt. Einen genaueren Überblick über die Laufzeiten, die CO₂-Injektionsraten und die CO₂-Gesamtinjektionsmengen ausgewählter CO₂-Projekte zur Speicherung in salinen Aquiferen geben Michael *et al.* (2010). Auf die Methoden, die zur Überwachung der CO₂-Speicherung am Standort Ketzin eingesetzt wurden, wird im Kapitel 3.3 eingegangen.

Bereits etablierte Überwachungsmethoden bei der CO₂-Injektion und CO₂-Speicherung sind u.a.:

- Seismische 2D-, 3D- und 4D-Oberflächenmessungen (z.B. Gorgon: Flett *et al.*, 2009; In Salah: Ringrose *et al.*, 2011; Otway: Urosevic *et al.*, 2011; Sleipner: Chadwick *et al.*, 2007; Hermanrud *et al.*, 2009; Snøhvit: Eiken *et al.*, 2011; Weyburn: White, 2013)
- Seismische Bohrlochmessungen (z.B. Frio-I: Daley *et al.*, 2008; Nagaoka: Saito *et al.*, 2006; SECARB Cranfield: Ajo-Franklin *et al.*, 2013)
- Passive Seismik (z.B. Weyburn: White, 2011)
- Gravimetrische 4D-Messungen (z.B. Sleipner: Alnes *et al.*, 2008)
- Elektromagnetische Bohrlochmessungen (z.B. K12-B: Vanderweijer *et al.*, 2011)
- Druck- und Temperaturmessungen am Bohrlochkopf und in der Injektionstiefe (z.B. Frio I: Hovorka *et al.*, 2006; Nagaoka: Sato *et al.*, 2011)
- Tracerexperimente (z.B. K12-B: Vanderweijer *et al.*, 2011; Otway: Stalker *et al.*, 2009)
- Grundwasserüberwachung (z.B. Otway: Hortle *et al.*, 2011)

- Satellitenbildanalyse (z.B. In Salah: Mathieson *et al.*, 2010; Mathieson *et al.*, 2009; Vasco *et al.*, 2010).

Bei der kommerziell genutztenen CO₂-Speicherung kommen besonders seismische Überwachungsmethoden zum Einsatz. Ihre Bedeutung gegenüber anderen geophysikalischen Explorationsmethoden wird beispielsweise durch ihren zuverlässigen Einsatz bei der Suche und Erkundung von Kohlenwasserstoff-Lagerstätten (Erdöl und Erdgas) deutlich (Bender, 1985).

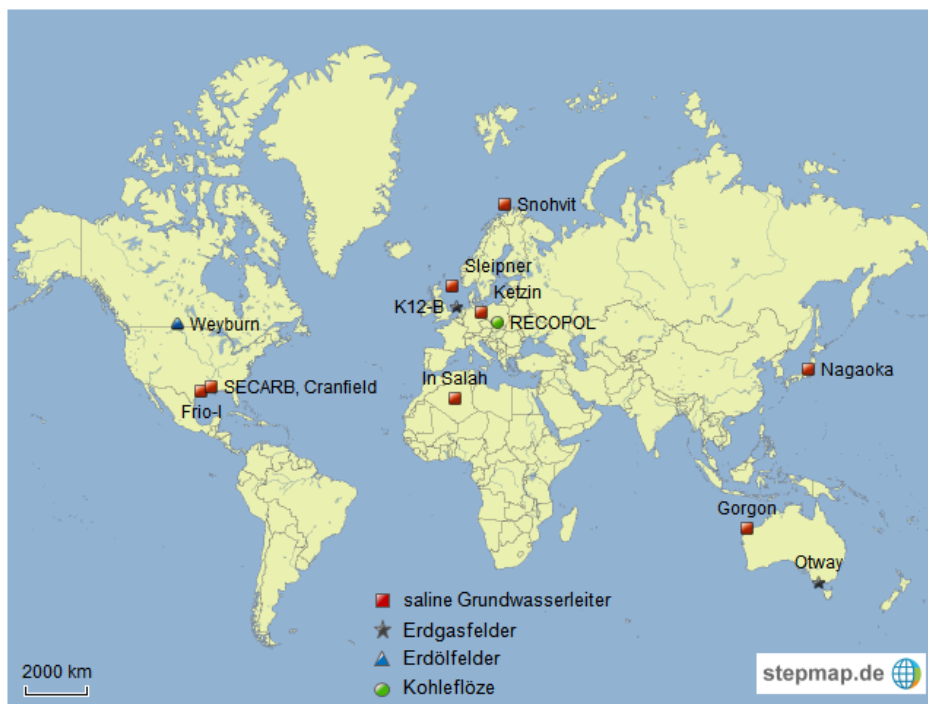


Abb. 2.6: Übersichtskarte (Quelle Kartenmaterial: www.stepmap.de) ausgewählter CO₂-Speicherstandorte wissenschaftlich und kommerziell genutzter geologischer Untergrundspeicher weltweit. Die CO₂-Speicher lassen sich in saline Aquifere (rot), Erdgasfelder (grau), Erdölfelder (blau) und Kohleflöze (grün) unterteilen.

Tab. 2.3: Zusammenstellung ausgewählter onshore (*) und offshore (**) CO₂-Speicheranlagen, ihrem Standort, ihrer wissenschaftlichen (w) oder kommerziellen (k) Nutzung, der Art des jeweiligen CO₂-Speichers (mit ECBM = *Enhanced Coal Bed Methane recovery*, EGR = *Enhanced Gas Recovery*, EOR = *Enhanced Oil Recovery*, ORC = *Offshore Reinjection of CO₂*), der CO₂-Injektionstiefe und der Speichermächtigkeit, sowie der Porosität ϕ , der Permeabilität k , der Temperatur T und des Druckes p des CO₂-Speichergesteins u.a. nach Michael *et al.* (2010), IPCC (2005) und Hosa *et al.* (2011).

CO ₂ -Projekt	CO ₂ -Speicherstandort	w	k	CO ₂ -Speicherart	CO ₂ -Injektionstiefe in m	Speichermächtigkeit in m	ϕ in %	k in mD	T in °C	p in bar	Methoden
Frio-*	Dayton, Texas, USA	x		saliner Aquifer	1.550	24	30	1.500	60	150	z.B. Hovorka <i>et al.</i> (2006); Doughty <i>et al.</i> (2008)
Gorgon**	Barrow Island, Westaustralien, Australien		x	saliner Aquifer	2.700	200 - 500	20	25	100	220	z.B. Flett <i>et al.</i> (2009)
In Salah*	Erdgasfeld in Kechba, Algerien		x	saliner Aquifer	1.850	29	17	5	90	180	z.B. Eiken <i>et al.</i> (2011); Mathieson <i>et al.</i> , 2010; Wildenborg <i>et al.</i> (2009)
K12-B**	Erdgasfeld in der Nordsee, Niederlande	x		stark ausgefördertes Erdgasfeld (EGR und ORC)	3.800	350	15	5 - 30	128	400	z.B. Vandenweijer <i>et al.</i> (2011)
Ketzin*	Ketzin, Deutschland	x		saliner Aquifer	650	80	23	750	35	70	z.B. Martens <i>et al.</i> (2012, 2011); Würdemann <i>et al.</i> (2010)
Nagaoka*	Nagaoka, Japan	x		saliner Aquifer	1.100	60	22	6	48	110	z.B. Sato <i>et al.</i> (2011); Mito & Xue (2011)
Otway*	Victoria, Australien	x		ausgefordertes Erdgasfeld	2.000	31	15	700		130	z.B. Sharma <i>et al.</i> (2011); Underschultz <i>et al.</i> (2011)
RECOPOL*	Katowice, Polen	x		Kohleflöze (ECBM)	1.100				40	86	z.B. van Bergen (2009)
SECARB*	Cranfield, Mississippi, USA	x		saliner Aquifer	3.150	60	20	50 – 1.000	120	340	z.B. Hovorka <i>et al.</i> (2013)
Sleipner**	Erdgasfeld in der Nordsee, Norwegen		x	saliner Aquifer	1.000	250	37	300 - 600	37	100	z.B. Eiken <i>et al.</i> (2011); Wildenborg <i>et al.</i> (2009)
Snohvit**	Erdgasfeld in der Barentssee, Norwegen		x	saliner Aquifer	2.700	60	13	450	98	280	z.B. Eiken <i>et al.</i> (2011); Estublier & Lackner (2009); Wildenborg <i>et al.</i> (2009)
Weyburn*	Weyburn, Saskatchewan, Kanada		x	stark ausgefördertes Erdgasfeld (EOR)	1.420	25 - 30	8 - 38	1 - 300			z.B. White (2013); Rostron & Whittaker (2011)

2.3.3 Geoelektrische Verfahren zur Überwachung der CO₂-Speicherung

Über bereits etablierte Überwachungsmethoden bei der CO₂-Injektion und CO₂-Speicherung wurde bereits im vorangegangenen Kapitel berichtet. Geoelektrische Verfahren werden dabei momentan noch selten angewandt.

Somit stellt sich die wissenschaftliche Frage, inwieweit geoelektrische Verfahren zur Überwachung der CO₂-Speicherung überhaupt geeignet und anwendbar sind. Es gilt zu untersuchen, wie genau die CO₂-Ausbreitung im Vergleich zu Standardmethoden abgebildet werden kann.

Bryant *et al.* (2001; 2002) beschrieben die erstmalige Anwendung eines permanenten Elektrodensystems im Bohrloch in einem produzierenden Erdölfeld eines Sandsteinreservoirs in Indiana (USA). Für die Durchführung des Experiments wurden in beiden Bohrungen jeweils 16 Elektroden in einer Tiefe von rund 308 m bis 325 m installiert. Der Abstand der beiden Bohrungen betrug rund 70 m (Bryant *et al.*, 2002). Das Ergebnis dieser Messungen zeigt die Anwendbarkeit permanent installierter Elektrodenanordnungen zur erfolgreichen Überwachung einer Frischwasserinjektion und seiner Ausbreitung im Erdölfeld zwischen einer Injektions- und einer Beobachtungsbohrung.

Analog zur Frischwasserausbreitung im Erdöl, wird erwartet, dass sich eine CO₂-Ausbreitung in einem salinen Aquifer ebenfalls untersuchen lässt. Während einer CO₂-Injektion in tiefliegende Sandsteine wird das hochleitfähige Salzwasser des Porenraums durch elektrisch nichtleitendes CO₂ verdrängt. Das hat zur Folge, dass der elektrische Widerstand im Reservoir steigt. Mit der Zeit löst sich das CO₂ im Formationswasser. Dies führt zu einer Widerstandsverringerung im Reservoir. In beiden Teilprozessen kommt es jeweils zu einer messbaren Widerstandsänderung im Reservoir. Das lässt erwarten, dass geoelektrische Verfahren in ihrer Anwendbarkeit zur Prozessüberwachung bei der CO₂-Injektion und CO₂-Speicherung in salinen Aquiferen vielversprechend sind.

In den folgenden Unterkapiteln werden numerische Modellierungen, Laborexperimente und Pilotstandorte (Feldexperimente) zusammengefasst. Numerische Modellierungen belegen und bewerten die Anwendbarkeit geoelektrischer Verfahren zur Überwachung der CO₂-Injektion und des CO₂-Speicherprozesses. Laborexperimente liefern einen Überblick über die Änderungen der elektrischen Eigenschaften bei einer CO₂-Injektion in Sandsteinproben unter in-situ Bedingungen. Es werden neben dem Pilotstandort Ketzin (Deutschland) zwei weitere CO₂-Speicherprojekte (Feldexperimente) mit geoelektrischen Verfahren zur Überwachung der CO₂-Speicherung vorgestellt, die zeitnah zum Feldexperiment in Ketzin stattfanden: die CO₂-Speicherstandorte Nagaoka (Japan) und Cranfield (USA).

2.3.3.1 Modellierungen zur geoelektrischen CO₂-Überwachung

Erstmals untersuchten Ramirez *et al.* (2003) und Christensen *et al.* (2006) in ihren numerischen Modellierungen grundlegend die Anwendbarkeit geoelektrischer Verfahren zur Überwachung der CO₂-Injektion und CO₂-Speicherung im Untergrund.

Ramirez *et al.* (2003) untersuchten unterschiedliche Elektrodenaufstellungen zur geoelektrischen Überwachung der CO₂-Injektion und CO₂-Speicherung im geologischen Untergrund in rund 1.200 m Tiefe (CO₂ ist superkritisch, Reservoirmächtigkeit = 14 m). Induktionslogs aus den 80er Jahren der Maljamar Pilotstudie zur CO₂-Flutung eines Sandsteinreservoirs in einem produzierenden Erdölfeld in New Mexico (USA) bildeten die Grundlage ihrer Studien. Anordnungen mit je zehn Punkt-Elektroden in neun Vertikalbohrungen wiesen die höchste Empfindlichkeit gegenüber elektrischen Widerstandsänderungen aufgrund der CO₂-Injektion auf. Während Anordnungen mit neun vertikalen Bohrungen, dessen Stahlverrohrung jeweils als Stabelektrode genutzt wurde, die CO₂-Ausbreitung nur lateral erfassten, ließen sich bei Anordnungen mit neun vertikalen und sechs horizontalen Bohrungen die CO₂-Ausbreitung sowohl vertikal als auch horizontal auflösen. Mit anderen Worten ist eine CO₂-Abbildung prinzipiell mit Anordnungen sowohl aus Punkt- als auch mit Stabelektroden möglich. Anordnungen, bei denen die Injektions- und Produktionsbohrungen in Erdölfeldern als Stabelektroden genutzt werden können, erweisen sich als kostengünstige Überwachungsmöglichkeit. Damit sind bei der Methode der Geoelektrik weder zusätzliche Beobachtungsbohrungen noch die Unterbrechung des Injektionsprozesses wie bei anderen Bohrlochmethoden noch die Installation von Messsensoren im Bohrloch notwendig. Eine Überwachung der Dichtheit der Deckschichten während der CO₂-Speicherung ist allerdings ausschließlich mit einer Punkt-Elektroden-Anordnung realisierbar.

Christensen *et al.* (2006) untersuchten anhand ihrer numerischen Modellierungen für das Otway CO₂-Speicherprojekt (Australien) die Anwendung geoelektrischer Verfahren zur Abbildung der CO₂-Ausbreitung zwischen zwei Bohrungen im Abstand von 200 m. In Tiefen von rund 2.000 m (95 °C, CO₂ ist superkritisch) mit jeweils 21 Elektroden in jeder Bohrung wurden unterschiedliche Elektrodenkonfigurationen genutzt. Pol-Pol- und Bipol-Bipol-Konfigurationen (inkl. Konfigurationen mit allen Elektroden in einer Bohrung) lieferten Ergebnisse mit der besten Auflösung, allerdings darf bei der Pol-Pol-Konfiguration die logistische Schwierigkeit der Installation der weit entfernten Oberflächenelektrode (mind. 6 km Abstand) nicht außer Acht gelassen werden. Das bedeutet, dass Bipol-Bipol-Messungen eine gute Alternative zur Pol-Pol-Konfiguration bei ähnlich guter Auflösung bieten. Vor der Anwendung elektrischer CO₂-

Überwachungsmethoden sollten die Elektrodenkonfigurationen an das Messgebiet angepasst und dafür optimiert werden. Geologische Reservoirinformationen sollten in der Inversion berücksichtigt werden.

Während Ramirez *et al.* (2003) und Christensen *et al.* (2006) das generelle Potenzial der Anwendung einer elektrischen Widerstandstomographie für die Überwachung der CO₂-Speicherung aufzeigten, beschrieb Hagrey (2011) in seinen numerischen Modellstudien das geoelektrische Auflösungsvermögen des gespeicherten superkritischen CO₂ im salinen Sandsteinreservoir und die Überwachung der Dichtheit der Deckschichten anhand von optimierten Elektrodenaufstellungen in zwei Bohrungen, sowie die Kombination von seismischen und geoelektrischen Modellstudien. Das erlaubt eine optimale Bestimmung der CO₂-Ausbreitung und CO₂-Sättigung im Reservoir (Hagrey *et al.*, 2013).

Picotti *et al.* (2013) untersuchten in ihrer Modellstudie für den CO₂-Speicherstandort Ketzin, ob eine potentielle bohrlochnahe CO₂-Ausbreitung in das Deckgebirge frühzeitig mithilfe geoelektrischer Bohrlochmessungen abgebildet werden kann. Tatsächlich ließ sich eine dünne hochohmige bohrlochnahe Zone bestenfalls mit Elektrodenabständen von maximal 0,5 m auflösen. Bei solch einer dünnen hochohmigen bohrlochnahen Schicht kann es sich entweder um Filterkuchen vom Bohren (engl.: *mud cake*), oder um eine mögliche CO₂-Ausbreitung im Ringraum der Bohrung (engl.: *well annulus*) handeln.

Es wird ersichtlich, dass numerische Modellierungen zur Anwendbarkeit geoelektrischer Verfahren die Grundlage für Laborexperimente und anschließende Feldversuche zur Überwachung der CO₂-Speicherung bilden.

2.3.3.2 Laborexperimente zur geoelektrischen CO₂-Überwachung

An Proben vom CO₂-Speicherstandort Nagaoka (Japan) bestimmten Nakatsuka *et al.* (2010) die CO₂-Sättigung anhand von Widerstandsmesswerten aus Labor-experimenten und Induktionslogs (induktive Widerstands-Bohrlochmessungen). Die durchgeführten Laboruntersuchungen unter in-situ Bedingungen (100 bar, 40°C, CO₂ ist superkritisch) zeigten deutlich, dass hohe Tongehalte im Sandstein (wie im untersuchten Tako Sandstein) zu deutlich geringeren Widerstandserhöhungen bei der CO₂-Injektion in Sandsteinproben führen als niedrigere Tongehalte (Berea Sandstein). Während die formationswassergesättigte (1 Ωm) homogene Berea Sandsteinprobe (geringer Tonanteil, $\phi = 19\%$, hohe Permeabilität $k = 100$ mD) bei der CO₂-Durchströmung elektrische Widerstandserhöhungen von rund 12 bis 14 Ωm auf 23 bis 38 Ωm zeigten,

stieg der gemessene elektrische Widerstand in der heterogenen Tako Sandsteinprobe (hoher Tonanteil, $\phi = 28 \%$, geringe Permeabilität $k = 7 \text{ mD}$) bei der CO_2 -Durchströmung von rund 15 bis 20 Ωm stark zeitverzögert auf rund 25 bis 67 Ωm an. Das bedeutet, dass das Vorhandensein von Tonen im Speichergestein zu deutlich geringeren und zeitlich verzögerten Widerstands-erhöhungen bei der CO_2 -Injektion führt, als es im tonfreien Sandsteinreservoir der Fall ist.

In Laborexperimenten von Onishi *et al.* (2006) wurde die Injektion von gasförmigen, flüssigen und superkritischen CO_2 in formationswassergesättigte (1 Ωm) Sandsteinproben (Berea Sandstein: geringer Tonanteil, $\phi = 18 \%$) unter in-situ Bedingungen (gasförmig: 30 bar, 15,5 bis 17,6°C; flüssig: 100 bar, 17,5 bis 18,0°C; superkritisch: 100 bar, 37 bis 38 °C) u.a. mittels geoelektrischen Verfahren für den CO_2 -Speicherstandort Nagaoka untersucht. Der elektrische Widerstand der gesättigten Sandsteinprobe stieg bei der CO_2 -Durchströmung bei allen drei Phasen an. Die Widerstandserhöhung erfolgte bei flüssigem und superkritischen CO_2 schneller als bei gasförmigen CO_2 . Das beutet, dass die Widerstandserhöhung aufgrund der Speicherung von superkritischem CO_2 in tiefen Aquiferen geoelektrisch zeitlich eher messbar ist als die Widerstandserhöhung aufgrund der Speicherung von gasförmigem CO_2 in weniger tiefen Reservoirs.

Bereits Myer (2001) untersuchte in seinen CO_2 -Durchströmungsexperimenten die Änderungen der geoelektrischen und seismischen Eigenschaften zweier Sandsteinproben (Berea Sandstein: $\phi = 20 \%$, Permeabilität $k = 150$ bis 300 mD; gesättigt mit Formationswasser 1,1 Ωm und 3,5 Ωm) bei der CO_2 -Durchströmung unter in-situ Bedingungen (42 °C, 103 bar). Sie bildeten die Grundlage für elektromagnetische und seismische Bohrlochmessungen zur Überwachung eines kommerziell genutzten CO_2 -Injektionstests in einem Erdölfeld in Kalifornien, USA. Die formationswassergesättigte (1,1 Ωm) Sandsteinprobe 1 zeigte bei der CO_2 -Injektion (Porendruck $p_{\text{pore}} = 21 \text{ bar}$, CO_2 ist gasförmig) Widerstandserhöhungen von 17 Ωm auf 38 Ωm , während der elektrische Widerstand der formationswassergesättigten (3,5 Ωm) Sandsteinprobe 2 von 43 Ωm auf 80 Ωm anstieg. Ein Anstieg des Porendruckes in der Versuchszelle von rund 21 auf 62 bar zeigte für die formationswassergesättigte (1,1 Ωm) Sandsteinprobe 1 für einen Porendruck von 62 bar (oberhalb des kritischen Punktes: CO_2 ist superkritisch) ähnlich hohe elektrische Widerstände von rund 50 Ωm wie bei einem Porendruck von 55 bar (CO_2 ist gasförmig). Ein Anstieg des Porendruckes in der Versuchszelle von rund 21 auf 62 bar zeigte für die formationswassergesättigte (3,5 Ωm) Sandsteinprobe 2 für Porendrücke von 41 und 55 bar (unterhalb des kritischen

Punktes: CO₂ ist gasförmig) jeweils elektrische Widerstände von rund 115 Ωm, während bei einem Porendruck von 62 bar (oberhalb des kritischen Punktes: CO₂ ist superkritisch) der elektrische Widerstand auf rund 90 Ωm absank.

Für den CO₂-Speicherstandort Cranfield, (USA) untersuchten Breen *et al.* (2012) die Anwendbarkeit geoelektrischer Verfahren für die Überwachung der räumlichen CO₂-Ausbreitung in formationswassergesättigten (1,6 Ωm) Sanden. Im unteren Bereich einer transparenten Versuchskammer (57 x 28 x 1 cm, insgesamt 42 Elektroden an den Außenseiten, 31,1 °C, 73,8 bar) simulierten grobkörnige Sande das heterogene, poröse Speichergestein, in das das superkritische CO₂ mit jeweils geringer und hoher Injektionsrate injiziert wurde. Die überlagernden feinkörnigen Sande bildeten die undurchlässigen Deckschichten. Die Ergebnisse der geoelektrischen Dipol-Dipol- und Pol-Tripol-Messungen zeigten, dass die CO₂-Sättigung stets mit geringeren Werten bestimmt wurde, als Vergleichsmessungen mit einer Videokamera (engl.: *charge coupled device camera, CCD camera*) brachten. Die Form, die Größe und die Lage des injizierten CO₂ waren mithilfe von ERT-Messungen gut bestimmbar. Allerdings ließen sich dünne Ausbreitungspfade nicht detektieren. Das CO₂-Laborexperiment mit geringen Injektionsraten bildete somit ausschließlich den CO₂-Frontbereich, nicht aber dünne vom CO₂-Injektionspunkt ausgehende Ausbreitungspfade, ab. Das CO₂-Laborexperiment mit hohen Injektionsraten simulierte die Ausbreitung des CO₂ durch die Deckschichten und damit einen undichten Speicher. Bereits anhand kleiner Sättigungsänderungen sind Leckagen im Deckgestein detektierbar. Mithilfe hoher Injektionsraten ließen sich auch die Ausbreitungspfade zwischen dem CO₂-Injektionspunkt und dem CO₂-Frontbereich besser abbilden. Zunehmende erhöhte Ankopplungswiderstände an den Elektroden waren Folgen elektrochemischer Reaktionen an den Elektrodenoberflächen aufgrund von Korrosionserscheinungen an den Elektroden. Der Grad der Korrosion konnte nicht damit in Verbindung gebracht werden, wie oft die jeweilige Elektrode bei den Messungen genutzt wurde. Allerdings führten Korrosionseffekte zu einer Langzeit-Verminderung der Datenqualität. Zusammenfassend lässt sich für Ketzin festhalten, dass sich mittels geoelektrischer Bohrlochmessungen die Größe und Lage des injizierten CO₂ prinzipiell gut abbilden lassen sollten, während dünne Ausbreitungspfade nicht detektierbar sein werden. Hohe Injektionsraten begünstigen die Auflösung der Bereiche zwischen dem CO₂-Injektionspunkt und dem CO₂-Frontbereich. In Ketzin liegen die CO₂-Injektionsraten (Kap. 4.3) sehr viel höher als die Injektionsraten in diesem Laborexperiment.

Kummerow & Spangenberg (2011) untersuchten in Langzeit-Durchströmungsexperimenten im Labor die Auswirkungen der Wechselwirkungen zwischen injiziertem

CO₂ (reines CO₂ und mit 1 vol % Schwefeldioxid kontaminiertes CO₂), Formationswasser (0,04 Ωm) und Reservoirgestein (Sandsteinprobe vom CO₂-Speicherstandort Ketzin, Deutschland; $\phi = 28 \%$; $k = 90$ mD) unter in-situ Bedingungen (hydrostatischer Druck 150 bar, Porenwasserdruck 75 bar und 40°C, CO₂ ist superkritisch) auf petrophysikalische Eigenschaften (elektrischer Widerstand, P-Wellengeschwindigkeit und Permeabilität). Die quarzreiche Sandsteinprobe B2-3b aus Ktzi202 ($l = 49,45$ mm, $d = 47,6$ mm; Probertiefe 629 m (u GOK)) zeigte bei der Injektion von reinem CO₂ weder irreversible Veränderungen seiner petrophysikalischen Eigenschaften noch Mineralneubildungen. Der elektrische Widerstand erhöhte sich während der CO₂-Injektion von 0,54 Ωm auf 1,73 Ωm und sank bei anschließender Injektion des Formationswassers wieder ab. Bei der CO₂-Injektion mit kontaminiertem SO₂ trat neben der Verfärbung der Sandsteinprobe und einer dauerhaften Änderung in der Permeabilität um immerhin 45 % auch eine geringere Widerstandserhöhung (lediglich 16 %) aufgrund der CO₂-Injektion auf. Eine irreversible Verringerung der Permeabilität erfordert eine enorme Erhöhung des Fluiddruckes am Injektionspunkt. Das ließe eine geringere injizierbare CO₂-Rate und damit eine geringere Gesamtspeichermenge erwarten. Allerdings stand für diese Durchströmungsexperimente nur sehr wenig Probenmaterial zur Verfügung. Zur Verifizierung dieser Aussagen wären Wiederholungsmessungen an weiterem Probenmaterial (aus allen drei Bohrungen) nötig. Das bedeutet, dass sich keine Rückschlüsse auf andere Reservoirtypen ziehen ließen. Es wird ersichtlich, dass die vorbeugende Injektion von CO₂ mit einem sehr hohen Reinheitsgrad von 99,9 %, (entspricht Lebensmittelqualität) am Standort Ketzin sinnvoll ist, um bessere Injektionsbedingungen zu schaffen.

Die betrachteten Untersuchungen zur Überwachung der CO₂-Speicherung mittels geoelektrischer Verfahren im Labor zeigen nicht nur die prinzipielle Anwendbarkeit, sondern liefern auch erste Erkenntnisse:

- Geringe Tongehalte im Sandstein führen zu größeren Widerstandserhöhungen bei der CO₂-Injektion als hohe Tongehalte.
- Die Injektion von flüssigem oder superkritischem CO₂ liefert zeitliche schnellere Widerstandserhöhungen als injiziertes gasförmiges CO₂.
- Sandsteine mit hochohmigem Formationsfluid weisen vor und nach der CO₂-Injektion generell höhere Widerstandswerte auf als Sandsteine mit leitfähigerem Formationswasser.
- Sandsteine mit hochohmigem Formationsfluid führen bei der Injektion von superkritischen CO₂ zu geringeren Widerstandswerten, als es bei der Injektion

von gasförmigem CO₂ der Fall ist; Sandsteine mit leitfähigerem Formationswasser haben niedrigere, aber konstante Widerstandswerte, unabhängig, ob superkritisches Fluid oder gasförmiges CO₂ injiziert wird.

- Je nach Elektrodenanordnungen lassen sich Größe und Lage des injizierten CO₂ gut abbilden, während dünne Ausbreitungspfade meist nicht auflösbar sind.
- Bei hohen Injektionsraten lassen sich die Ausbreitungspfade zwischen dem CO₂-Injektionspunkt und dem CO₂-Frontbereich besser abbilden als bei geringen Injektionsraten.
- Korrosionseffekte erhöhen die Ankopplungswiderstände.
- Die CO₂-Injektion mit kontaminiertem Schwefeldioxid (SO₂) könnte aufgrund von irreversiblen Änderungen der petrophysikalischen Eigenschaften zu schlechten Injektionsbedingungen im Reservoir führen.

Für das Sandsteinreservoir am Standort Ketzin bedeuten diese Erkenntnisse, dass bei einem Formationsfluid mit einem sehr geringen spezifischen elektrischen Widerstand von 0,05 Ωm generell mit sehr niedrigen elektrischen Widerständen gerechnet werden muss, unabhängig davon, ob das injizierte CO₂ gasförmig oder superkritisch im Speichergestein vorliegt.

2.3.3.3 CO₂-Speicherstandorte mit geoelektrischer CO₂-Überwachung

Neben dem deutschen Pilotstandort Ketzin (ausführlich in Kapitel 3 beschrieben) existieren weltweit zwei weitere CO₂-Speicherstandorte, an denen geoelektrische Verfahren zur Überwachung der CO₂-Ausbreitung im Untergrund zeitnah zum Feldexperiment in Ketzin angewandt wurden: Nagaoka (Japan) und das Erdölfeld Cranfield (USA). Im Folgenden sollen beide Standorte näher beschrieben und ihre geoelektrische CO₂-Überwachung genauer betrachtet werden.

Am CO₂-Speicherstandort Nagaoka (Japan, CO₂-Injektionsstart: 07/2003) wurden erstmals umfangreiche Widerstands-Bohrlochmessungen (Logging) zur Überwachung der CO₂-Ausbreitung im Untergrund durchgeführt, während am Pilotstandort Ketzin (Deutschland, CO₂-Injektionsstart: 06/2008) und Cranfield (USA, CO₂-Injektionsstart: 12/2009) geoelektrische Bohrlochmessungen zwischen mehreren Bohrungen über permanent installierte Bohrlochelektroden realisiert werden konnten. In Cranfield wurden erstmals geoelektrische Bohrlochmessungen in Tiefen von mehr als 3.000 m realisiert. Am Standort Ketzin wurden die Bohrlochelektroden auch in der Injektionsbohrung installiert und zusätzlich kombinierte geoelektrische Messungen an der Erdoberfläche und in den Bohrungen durchgeführt. An allen drei Speicherstandorten wurde das CO₂ in einen salinen Aquifer injiziert, wobei jeweils die Tiefenlage und Mächtigkeit des Speichergesteins, sowie die Speichermengen variieren. Die Anordnungen der Bohrungen der drei CO₂-Speicherstandorte sind in Abbildung 2.7 dargestellt. Die wesentlichen Merkmale dieser CO₂-Speicherstandorte sind in Tabelle 2.4 zusammengefasst.

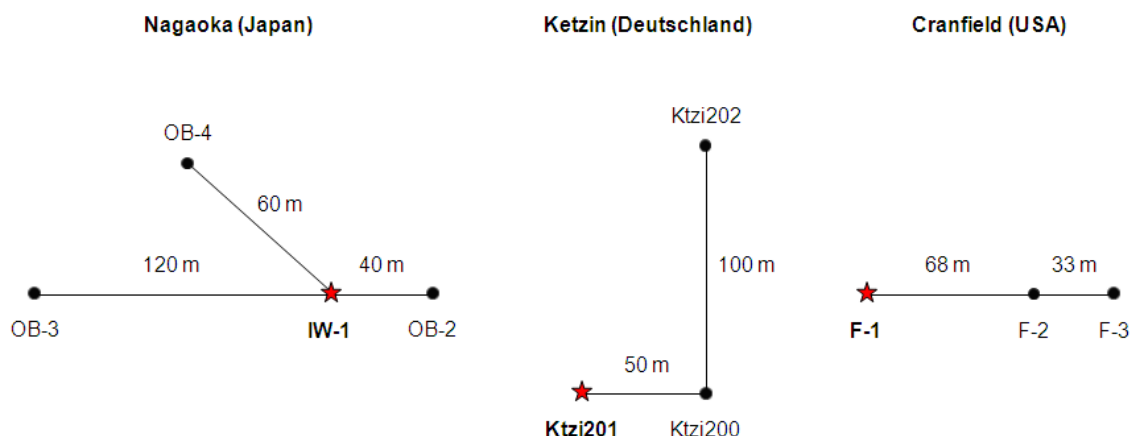


Abb. 2.7: Lage der jeweiligen Injektionsbohrung (roter Stern) und der Beobachtungsbohrungen (schwarzer Punkt) für die drei CO₂-Speicherstandorte Nagaoka in Japan (links; nach Sato *et al.*, 2011), Ketzin in Deutschland (mitte; nach Kiessling *et al.*, 2010b) und Cranfield in USA (rechts; nach Ajo-Franklin *et al.*, 2013).

Tab. 2.4: Übersicht der einzelnen Parameter der drei CO₂-Speicherstandorte Nagaoka (Japan), Ketzin (Deutschland) und Cranfield (USA).

	Nagaoka, Japan	Ketzin, Deutschland	Cranfield, USA
durchgeführte geoelektrische Verfahren	Widerstands- Bohrlochmessungen (Logging)	geoelektrische Bohrlochmessungen zwischen 3 Bohrungen; geoelektrische Oberflächen- Bohrloch-Messungen	geoelektrische Bohrlochmessungen zwischen 2 Bohrungen
Injektionsbohrung	IW-1	Ktzi201	F-1
Beobachtungs- bohrungen für Geoelektrik	OB-2, OB-3, OB-4	Ktzi200, Ktzi201, Ktzi202	F-2, F-3
Speichertiefe (u GOK)	rund 1.100 m	rund 640 m	rund 3.150 m
Speicherformation	saliner Sandstein der Haizume Formation	saliner Sandstein der Stuttgart-Formation	saliner Sandstein der Unteren Tuscaloosa Formation
Mächtigkeit der Sandsteinschicht	9 - 12 m	9 - 18 m	15 - 26 m
Reservoirtemperatur	48 °C	35 °C	125 °C
Reservoirdruck	190 bar	62 - 74 bar	320 bar
CO₂- Injektionszeitraum/ Messzeitraum*	07/2003 - 01/2005	06/2008 - 05/2009*	12/2009 - 09/2010 (DAS-Studie)
CO₂-Injektionsrate	0,8 - 1,7 t/h	0 - 3,25 t/h	11 - 30 t/h
Gesamtinjektions- menge (des Messzeitraumes*)	10.400 t CO ₂	67.271 t CO ₂ (14.700 t CO ₂ *)	5,37 Mill t CO ₂ (04/2009 - 01/2015)
Art des injizierten CO₂	lebensmittelreines CO ₂ (Reinheitsgrad von 99,9 %; industriell hergestellt)	lebensmittelreines CO ₂ (Reinheitsgrad von 99,9 %; industriell hergestellt)	vom Jackson Dome (natürliche Quelle; industrielle Förderung)
CO₂ Phase	superkritisch	gasförmig/ superkritisch	superkritisch

spez. el. Widerstand des Formations- wassers σ	0,8 Ωm	0,05 Ωm	0,06 Ωm
CO₂-Ausbreitungs- geschwindigkeit im Reservoir	rund 0,17 m/ d	rund 0,4 - 2,3 m/ d	rund 5 - 11 m/ d

Am **CO₂-Speicherstandort Nagaoka** (Japan) wurde von 07/2003 bis 01/2005 (554 Injektionstage) eine Gesamtmenge von 10.400 t lebensmittelreinem, industriell hergestelltem CO₂ über eine Injektionsbohrung in den salinen Sandstein (9 - 12 m mächtig) der Haizume Formation in eine Tiefe von rund 1.100 m zu Forschungszwecken injiziert (48 °C, 110 bar, CO₂ ist superkritisch; Xue *et al.*, 2006; Mito & Xue, 2011). Das Messgebiet umfasste neben der Injektionsbohrung IW-1 drei Beobachtungsbohrungen OB-2, OB-3 und OB-4. Die Beobachtungsbohrungen OB-2 und OB-3 waren, mit der Injektionsbohrung IW-1 im Mittelpunkt, kollinear angeordnet. Mittels der durchgeführten Bohrlochmessungen konnte die CO₂-Ankunft an den beiden Beobachtungsbohrungen OB-2 (03/2004, nach 220 bis 247 Injektionstagen, nach rund 4.000 t injiziertem CO₂) und OB-4 (07/2004, nach 343 bis 347 Injektionstagen, nach rund 5.500 t injiziertem CO₂) erfolgreich verifiziert werden.

Widerstands-Bohrlochmessungen in der Beobachtungsbohrung OB-2 zeigten zum Zeitpunkt der CO₂-Ankunft eine Erhöhung des elektrischen Widerstandes von rund 5 auf 5,5 Ωm (Xue *et al.*, 2006; Mito & Xue, 2011; Sato *et al.*, 2011). An der Beobachtungsbohrung OB-3 konnte bis 01/2008 keine CO₂-Ankunft nachgewiesen werden (Sato *et al.*, 2011). Die Widerstands-Bohrlochmessungen wurden in der Beobachtungsbohrung OB-4 von der Oberfläche bis zur Speichertiefe durch andere Messkabel gestört und lieferten keine Messergebnisse (Mito & Xue, 2011). Die Logging-Ergebnisse der Beobachtungsbohrung OB-2 (Abb. 2.8) hingegen zeigten, dass sich der elektrische Widerstand nach CO₂-Ankunft an der Beobachtungsbohrung OB-2 auch nach Injektionsende 01/2005 weiter auf rund 6,6 Ωm erhöhte und dann kontinuierlich wieder auf rund 5,5 Ωm absank (Mito & Xue, 2011; Sato *et al.*, 2011; Nakajima & Xue, 2013).

Die Überwachung nach Beendigung der CO₂-Injektion lieferte Informationen zum Langzeitspeicherverhalten im Reservoir (Mito & Xue, 2011). Xue *et al.* (2009) zeigten in ihren Labor- und Feldexperimenten, dass sich neben der superkritischen CO₂-Verteilung

auch bereits im Formationswasser gelöstes CO₂ detektieren ließ. Die Langzeit-Messungen ergaben gelöstes CO₂ im oberen sowie unteren Bereich der CO₂-Fahne im Speicherhorizont (Abb. 2.9; Mito & Xue, 2011). Fluidbeprobungen bestätigten die Bereiche des im Formationswasser gelösten CO₂ (Xue, 2012). Während Fleury & Deschamp (2008) anhand von Messungen unter Laborbedingungen zeigten, dass in Lösung gegangenes CO₂ kurzfristig keinen Einfluss auf den gemessenen Widerstand hat, belegten die Widerstands-Bohrlochmessungen am Standort Nagaoka hingegen, dass langfristig eine Widerstandsverringerung ober- und unterhalb der Zone mit freiem CO₂ (superkritisch) innerhalb der CO₂-Fahne messbar wurde. Bei entsprechendem Auflösungsvermögen erlaubte das eine Beschreibung der Lösung von CO₂ im Formationswasser und damit die chemische Lösungsrückhaltung für eine sichere CO₂-Speicherung.

Neben den Widerstands-Bohrlochmessungen wurden kontinuierliche Druck- und Temperaturmessungen (IW-1 und OB-4; Sato, 2006; Sato *et al.*, 2009; Sato *et al.*, 2011), seismische Bohrlochmessungen zwischen den beiden Beobachtungsbohrungen OB-2 und OB-3 (Saito *et al.*, 2006), Fluidbeprobungen (Mito *et al.*, 2008), Porositätsmessungen und akustische Bohrlochmessungen (Xue *et al.*, 2006; Sato *et al.*, 2011), sowie Modellierungen (Sato *et al.*, 2011) und CO₂-Sättigungsbestimmungen (Nakatsuka *et al.*, 2010) bis 2008 durchgeführt.

Die Kombination seismischer und geoelektrischer Verfahren ermöglichte eine effektivere Auflösung der CO₂-Sättigungsverteilung als die alleinige Nutzung seismischer Verfahren. Der elektrische Widerstand reagierte konstant sensitiv über einen großen CO₂-Sättigungsbereich und sensitiver als die P-Wellen-Geschwindigkeit bei CO₂-Sättigungen größer als 20 % (Abb. 2.10; Xue *et al.*, 2009). Man verspricht sich durch die Nutzung der Geoelektrik besonders bei großen CO₂-Sättigungen eine bessere Auflösung seiner Verteilung im Reservoir als es mit seismischen Standardverfahren momentan der Fall ist.

Es wurde gezeigt, dass das Vorhandensein von Ton im Sandstein zu einer geringeren Widerstandserhöhung während der CO₂-Injektion führte als es bei nicht-tonigen Sandsteinen der Fall war (Nakatsuka *et al.*, 2010). Das macht die Methode der Geoelektrik in seiner Empfindlichkeit hinsichtlich der Überwachung der CO₂-Speicherung abhängig vom Vorhandensein von Ton im Speicherreservoir.

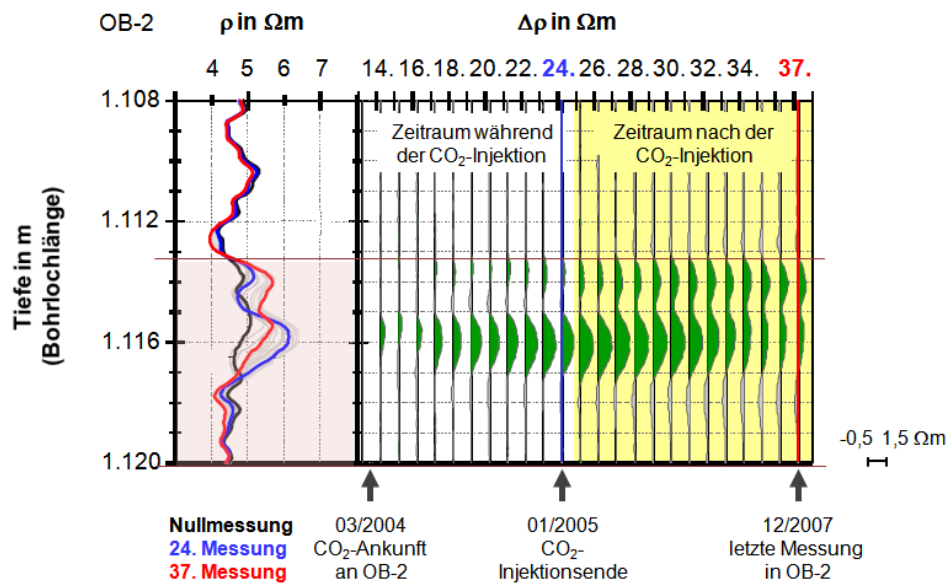


Abb. 2.8: Links: Darstellung der Widerstände mit der Tiefe aus den Widerstands-Bohrlochmessungen in der Beobachtungsbohrung OB-2 des CO_2 -Speicherstandortes Nagaoka (Japan) mit der Nullmessung (schwarz: Mittelwert für den Zeitraum vor der CO_2 -Ankunft an OB-2 vom 06/2003 bis 02/2004), der 24. Messung (blau: 01/2005, Ende der CO_2 -Injektion) und der 37. Messung (rot: 12/2007). Die Tiefenlage des salinen Sandsteinaquifers in der OB-2 ist rosa markiert (Zone-2b, nach Sato *et al.*, 2011). Rechts: Darstellung der Widerstandsänderungen für jede Widerstands-Bohrlochmessung vom 03/2004 bis 12/2007 (nach Mito & Xue, 2011).

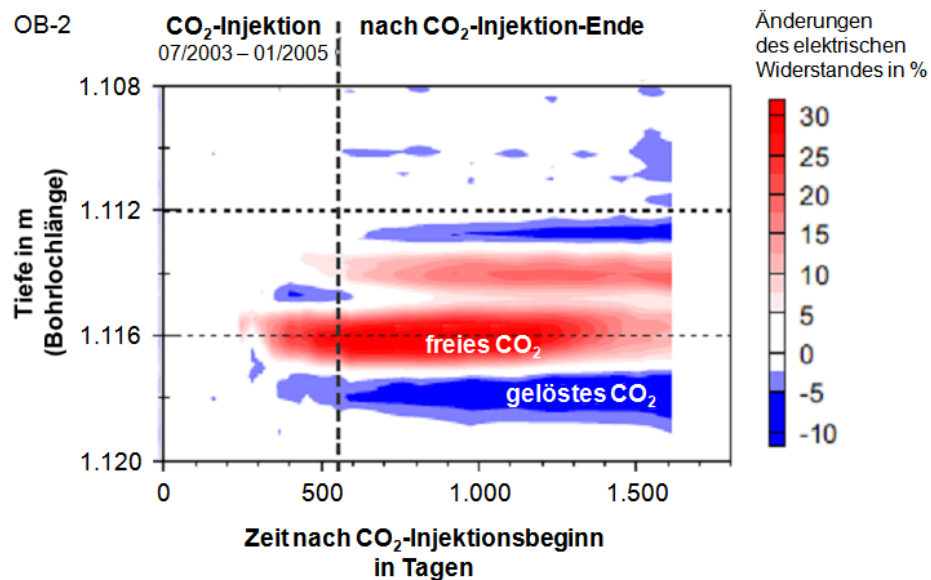


Abb. 2.9: Darstellung der zeitlichen Änderung des gemessenen elektrischen Widerstandes in der Beobachtungsbohrung OB-2. In einer Tiefe um 1.114 m und 1.116 m kann durch eine Widerstandserhöhung (rot) auf freies (superkritisches) CO_2 geschlossen werden, während eine Widerstandsabnahme (blau) auf gelöstes CO_2 hindeutet (nach Mito & Xue, 2011).

OB-2
z = 1.116 m

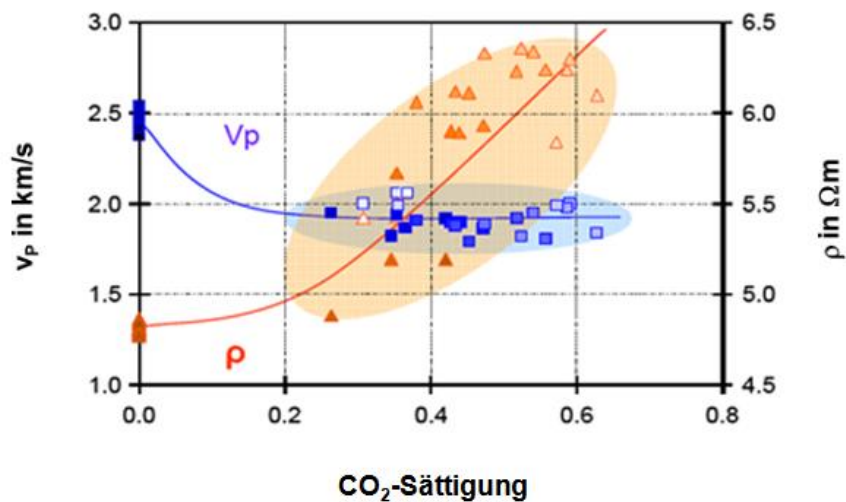


Abb. 2.10: Darstellung der gemessenen Änderungen der P-Wellen-Geschwindigkeit und der des elektrischen Widerstandes mit zunehmender CO_2 -Sättigung in der Beobachtungsbohrung OB-2 in einer Tiefe von 1.116 m während der CO_2 -Injektion. Während sich der elektrische Widerstand mit zunehmender CO_2 -Sättigung stetig erhöht, nimmt die P-Wellen-Geschwindigkeit immer weniger stark ab (nach Xue *et al.*, 2009).

Am **CO_2 -Speicherstandort Cranfield** in Natchez (Mississippi, USA) wurde von 04/2009 bis 01/2015 mit einer jährlichen Injektionsrate von rund 1,5 Mt CO_2 in das Erdölfeld Cranfield (kommerziell genutzter CO_2 -Speicher) im Rahmen des Forschungsprojektes SECARB (Southeast Regional Carbon Sequestration Partnership) superkritisches CO_2 über 23 Injektionsbohrungen injiziert (Carrigan *et al.*, 2009; Hovorka *et al.*, 2011; Hovorka *et al.*, 2013). Das verwendete CO_2 stammte aus dem natürlichen Kohlenstoffdioxidfeld des Jackson Dome Vulkans und wurde mittels einer 160 km langen Pipeline zum Speicherstandort transportiert (Lu *et al.*, 2012b). Es wurden Methoden zur Überwachung der CO_2 -Speicherung unter Bedingungen zur verbesserten Erdölgewinnung (engl.: *Enhanced Oil Recovery, EOR*) getestet (Hovorka *et al.*, 2011). Die geoelektrischen Bohrlochmessungen fanden im Rahmen einer Detailgebietsstudie (engl.: *Detailed Area Study, DAS*) statt. Das Messgebiet umfasste eine Injektionsbohrung CFU 31-F1 und zwei Beobachtungsbohrungen CFU 31-F2 und CFU 31-F3 (engl.: *Cranfield Unit, CFU*; kurz: F-1, F-2 und F-3) (Lu *et al.*, 2012a; Hovorka *et al.*, 2013). Die drei Bohrungen waren im Abstand von rund 68 m (F-1 bis F-2) und von rund 33 m (F-2 bis F-3) kollinear angeordnet. Die 21 ringförmigen Elektroden wurden auf der je rund 130 m langen Glasfaserverrohrung der beiden Beobachtungsbohrungen installiert (Carrigan *et al.*, 2009; Hovorka *et al.*, 2011). Die 14 Elektroden der Beobachtungsbohrung F-2 waren im Tiefenbereich von rund 3.160 bis 3.220 m im Abstand von rund 4,5 m angeordnet, während die 7 Elektroden der

Beobachtungsbohrung F-3 im gleichen Tiefenbereich im Abstand von rund 9 m installiert wurden (Carrigan *et al.*, 2013). Die CO₂-Injektion über die Injektionsbohrung F-1 der DAS-Studie fand zeitlich deutlich nach dem CO₂-Injektionsbeginn am Pilotstandort Ketzin (06/2008) statt. Am CO₂-Speicherstandort Cranfield wurde von 12/2009 bis 12/2010 in einen salinen Sandsteinaquifer (15 bis 26 m mächtig, Ajo-Franklin *et al.*, 2013) der Unteren Tuscaloosa Formation (126 °C, 320 bar, CO₂ ist superkritisch) in rund 3.150 m Tiefe mit einer CO₂-Injektionsrate von 11 bis 30 t/h injiziert (Hovorka *et al.*, 2011; Doetsch *et al.*, 2013; Carrigan *et al.*, 2013).

Mittels der durchgeführten geoelektrischen Messungen (Dipol-Dipol- und Wenner-Messungen) in den beiden Beobachtungsbohrungen F-2 und F-3 konnte die CO₂-Ankunft an der ersten Beobachtungsbohrung F-2 nach 11 - 14 bzw. an der zweiten Beobachtungsbohrung F-3 nach 15 - 17 Tagen kontinuierlicher CO₂-Injektion in die Bohrung F-1 erfolgreich erfasst werden (Doetsch *et al.*, 2013). Die Ergebnisse (Abb. 2.11, Yang & Carrigan, persönliche Mitteilungen, 2013) zeigten eine kontinuierliche und konsistente CO₂-Ausbreitung, sowie eine Zunahme der CO₂-Sättigung zwischen den beiden Beobachtungsbohrungen (Carrigan *et al.*, 2013). Doetsch *et al.* (2013) beschrieben die gemeinsame Inversion und Modellierung struktureller, geochemischer und geoelektrischer Daten zum Abgleich hydrologischer Modelle. Neben den geoelektrischen Messungen wurden umfangreiche Messungen im Bohrloch, beispielsweise geochemische Untersuchungen (Lu *et al.*, 2012a; Lu *et al.*, 2012b), CO₂-Sättigungsmessungen, Widerstands-Bohrlochmessungen (Butsch *et al.*, 2013), gravimetrische Bohrlochmessungen (Dodds *et al.*, 2013), seismische Bohrlochmessungen (Ajo-Franklin *et al.*, 2013) und hydrologische Untersuchungen, durchgeführt. An der Erdoberfläche fanden seismische 3D- Messungen (Zhang *et al.*, 2013) statt. Reservoirmodellierungen (Hosseini *et al.*, 2012) und seismische CO₂-Sättigungsmodellierungen (Carter & Spikes, 2013) vervollständigen das Forschungsvorhaben.

Allerdings waren die geoelektrischen Daten aufgrund äußerer Störeinflüsse stark verrauscht (Yang *et al.*, 2014). Die aus den ERT-Messungen bestimmte CO₂-Sättigung war somit geringer als die aus dem Bohrlochlogging (Punktmessung; engl.: *reservoir saturation tool*) ermittelte (Carrigan *et al.*, 2013). Die Temperatur- und Drucksensoren sowie die Hydrophone für das aktive seismische Monitoring fielen nacheinander aus und konnten im Gegensatz zum geoelektrischen Monitoring keine Daten liefern (Hovorka *et al.*, 2013). Damit bewies die Geoelektrik im Vergleich zu klassischen Standardmonitoringmethoden ihren zuverlässigen Einsatz bei der CO₂-Speicherüberwachung.

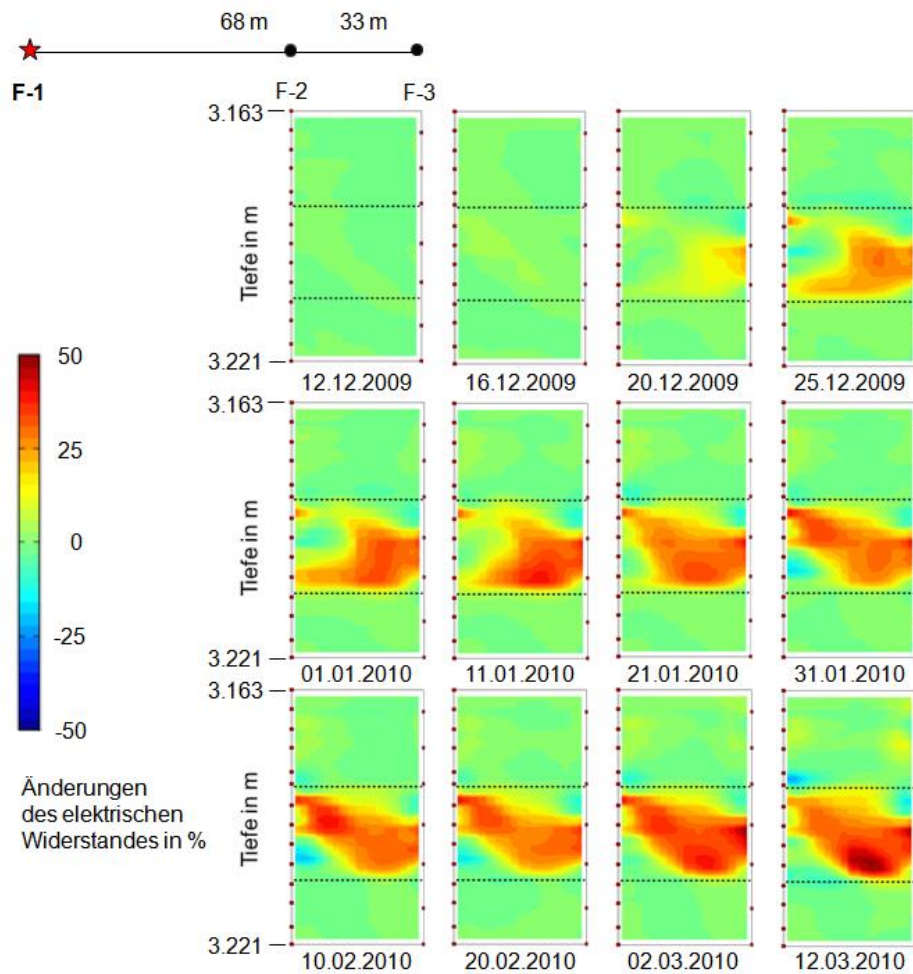


Abb. 2.11: Darstellung der Ergebnisse der geoelektrischen Bohrlochmessungen zwischen den Beobachtungsbohrungen F-2 und F-3 vom CO₂-Speicherstandort Cranfield (USA). Es sind die zeitlichen Änderungen des elektrischen Widerstandes mit der Tiefe für den CO₂-Injektionsfortschritt nach dem Beginn der CO₂-Injektion (01.12.2009) in der Injektionsbohrung F-1 dargestellt (Yang & Carrigan, persönliche Mitteilungen). Die Widerstandsänderungen entsprechen den Ergebnissen der CO₂-Sättigung aus Carrigan *et al.* (2013; Abb. 7).

2.3.4 Zusammenfassung der Methodeneignung: Geoelektrik zur Überwachung der CO₂-Speicherung

Um die Geoelektrik als Überwachungsmethode für die CO₂-Injektion und CO₂-Speicherung in salinen Aquiferen einzusetzen, muss es zu einer Änderung des elektrischen Widerstandes im Reservoir kommen. Das elektrisch nichtleitende CO₂ (gasförmig oder superkritisch) verdrängt während der Injektion in die tiefliegenden Sandsteine das hochleitfähige Formationswasser im Porenraum. Der elektrische Widerstand im Reservoir nimmt zu. Sobald das CO₂ im Formationswasser in Lösung übergeht, nimmt der elektrische Widerstand im Reservoir ab. Es kommt jeweils zu detektierbaren Widerstandsveränderungen. Somit ist die Geoelektrik als Methode prinzipiell geeignet, um die CO₂-Speicherung in saline Aquifere zeitlich zu überwachen und abzubilden.

Eine grundlegende Anwendbarkeit untersuchten Ramirez *et al.* (2003) und Christensen *et al.* (2006) dabei in ihren numerischen Modellierungen. Sie stellen fest, dass eine CO₂-Abbildung sowohl mit Anordnungen aus Punkt- als auch mit Stabelektroden möglich ist. Hagrey (2011) beschreibt in seinen numerischen Modellstudien die räumliche Auflösung des gespeicherten superkritischen CO₂ im salinen Sandsteinreservoir anhand von optimierten Elektrodenaufstellungen, sowie die Kombination von seismischen und geoelektrischen Verfahren zur optimalen Bestimmung der CO₂-Ausbreitung und CO₂-Sättigung im Reservoir (Hagrey *et al.*, 2013).

Laborexperimente lieferten einen Überblick über die Änderungen der elektrischen Eigenschaften bei einer CO₂-Injektion in Sandsteinproben unter in-situ Bedingungen. Dazu gehört beispielsweise der Einfluss des Tongehaltes (Nakatsuka *et al.*, 2010), der CO₂-Phase (Onishi *et al.*, 2006), der Leitfähigkeit des Formationswassers (Myer, 2001), die CO₂-Injektionsrate (Breen *et al.*, 2012), aber auch Korrosionseffekte (Breen *et al.*, 2012) auf die gemessenen Widerstandsänderungen im Reservoir. Eine Interpretation der geoelektrischen Messwerte im Feldversuch ist auf der Grundlage dieser Laborergebnisse aus Untersuchungen unter in-situ Bedingungen möglich.

Besonders an kommerziell genutzten CO₂-Speicherstandorten wurden bisher vor allem seismische Verfahren zur Überwachung des CO₂-Speicherprozesses angewandt. Ein Grund für die zeitige Etablierung der Seismik als wesentliche Überwachungsmethode der CO₂-Speicherung war die Fachexpertise und die Erfahrung, die bereits aus der Prospektion und Exploration von Rohstoffen (Kohlenwasserstoff-Lagerstätten: Erdöl und Erdgas) vorlag und bereits zu Beginn des 20. Jahrhunderts eine entscheidende Rolle

spielte. Die Geoelektrik gewann als Erkundungsmethode erst viel später an Bedeutung. Mittlerweile findet sie auf immer mehr Gebieten Anwendung.

Inzwischen gilt die Methode der Geoelektrik als potentielle und v.a. kostengünstige alternative Überwachungsmethode. Geoelektrische Bohrlochmessungen lassen sich, im Gegensatz zu anderen Bohrlochmethoden, ohne Unterbrechung des CO₂-Injektionsprozesses durchführen, da die Elektroden permanent im Bohrloch installiert sind. Geoelektrische Methoden sind auch in der Injektionsbohrung selbst anwendbar und ermöglichen somit die Überwachung des nahen Umfeldes des CO₂-Injektionspunktes. Im Gegensatz zu bereits etablierten Standardverfahren ist die Möglichkeit einer kontinuierlichen zeitlichen Überwachung damit gegeben.

Die Anwendung geoelektrischer Verfahren im Bohrloch zur Überwachung der CO₂-Speicherung in tiefen salinen Aquiferen wurde anhand von Feldexperimenten an den Speicherstandorten Nagaoka (Japan) und Cranfield (USA) demonstriert. Messungen am Speicherstandort Nagaoka belegen, dass sich langfristig auch Bereiche mit bereits im Formationswasser gelösten superkritischem CO₂ anhand von Widerstandsverringerungen mittels Messungen mit dem Induktions-Log bestimmen lassen (Xue *et al.*, 2009; Mito & Xue, 2011). Es wurde gezeigt, dass die Kombination geoelektrischer Verfahren mit seismischen Standardverfahren eine effektivere Auflösung der CO₂-Sättigungsverteilung ermöglicht als die alleinige Nutzung von seismischen Messverfahren. Darüber hinaus wurde gezeigt, dass der elektrische Widerstand bei CO₂-Sättigungen größer als 20 % sogar sensitiver als die P-Wellen-Geschwindigkeit reagiert (Xue *et al.*, 2009). Am Speicherstandort Cranfield konnte die Installation von Bohrlochelektroden und damit auch ein Monitoring in sehr großen Tiefen von über 3.000 m Tiefe realisiert werden. Trotz großer Störeinflüsse konnte die CO₂-Ausbreitung im Reservoir erfolgreich abgebildet werden.

Anhand von Modellstudien, Laboruntersuchungen und Feldexperimenten konnten die Machbarkeit und auch das Potential geoelektrischer Verfahren zur Überwachung der CO₂-Speicherung aufgezeigt werden. Im Folgenden wird der für diese Arbeit relevante Pilotstandort Ketzin vorgestellt.

3. Pilotstandort Ketzin

Im folgenden Unterkapitel wird ein Überblick über die Projektziele und Forschungsinhalte der Pilotanlage Ketzin gegeben (Kap. 3.1). Es wird die Standorteignung für eine CO₂-Speicherung im geologischen Untergrund von Ketzin erörtert. Die Lokation und die Geologie des Untersuchungsgebietes werden in Kapitel 3.2 beschrieben. Es wird die Gewinnung von Bohrkernen, ihre Gesteinsansprache und Untersuchung im Labor vorgestellt und auf ausgewählte Methoden zur Überwachung der CO₂-Ausbreitung im Untergrund von Ketzin in Kapitel 3.3 eingegangen. Diese Ergebnisse werden in den folgenden Kapiteln zur Interpretation der im Rahmen dieser Arbeit geplanten, durchgeführten und ausgewerteten geoelektrischen Messungen herangezogen. Sie dienen der Vervollständigung und Bestätigung der Ergebnisse der angewandten geoelektrischen Verfahren (Kap. 4 und 5).

3.1 Forschungsprojekte am CO₂-Pilotstandort Ketzin

Die CO₂-Speicherung im tiefen geologischen Untergrund wird als eine vielversprechende Maßnahme zur Verringerung der anthropogenen Treibhausgasemission gesehen. Das größte Speicherpotential wird aufgrund seiner weltweit großen Verbreitung den salinen Aquiferen zugeschrieben (Kap. 2.2).

Im Rahmenplan des Europäischen Energieprogramms zur Konjunkturbelebung (engl.: *European Energy Programme for Recovery, EEPR*) der Europäischen Kommission ist eine kommerzielle Nutzung der CCS-Technologie bis 2020 angestrebt (EEPR, 2011). Nachdem wichtige Arbeiten auf dem Gebiet der CO₂-Speicherung und dessen Überwachung vorausgegangen waren (Kap. 2.3), sollten nun unterschiedliche Monitoringmethoden an einem Pilotstandort im Feldversuch mit begrenzter CO₂-Injektionsmenge angewandt und getestet werden. Die Europäische Union förderte die europaweit erste landgestützte Pilotanlage, in der CO₂ mit einer Gesamtmenge von rund 60.000 Tonnen in einer Tiefe von rund 800 m in poröse und salzwasserführende Sandsteine (saline Aquifere) gespeichert werden sollte. Erst nachdem Demonstrationsprojekte (wie Ketzin) die dauerhafte und sichere Abscheidung, Transport und Speicherung von CO₂ nachweisen und eine Speicherüberwachung gewährleistet werden kann, ist eine großmaßstäbliche und damit klimarelevante Umsetzungen der Technologie zur Abscheidung und Speicherung von CO₂ im tiefen geologischen Untergrund (CCS) überhaupt möglich (Liebscher *et al.*, 2012).

Folgende wichtige Voraussetzungen werden u.a. an solch einen Pilotstandort gestellt:

- Speicherart mit hoher CO₂-Aufnahmekapazität und großem Vorkommen
- Gute ökonomische Erschließung des Geländes (Zugänglichkeit)
- Geologische Vorinformationen.

Für eine klimarelevante CO₂-Speicherung müsste das CO₂ aus Kohle- und Gaskraftwerken sowie aus industriellen Großanlagen (beispielsweise Stahlwalzwerke, Zementfabriken, Raffinerien) abgeschieden und auf möglichst kurzem Wege zum Untergrundspeicher transportiert werden (Europäisches Exzellenznetzwerk CO₂GeoNet, 2009). Zur Injektion am Pilotstandort Ketzin wurde ausschließlich reines CO₂ der Firma Linde AG (Reinheitsgrad von 99,9 %, entspricht Lebensmittelqualität) genutzt. Aufgrund der Verwendung von nicht-kontaminiertem CO₂ werden irreversible Veränderungen der petrophysikalischen Eigenschaften und Mineralneubildungen vorgebeugt und somit optimale Injektionsvoraussetzungen geschaffen. Zu den allgemeinen Projektzielen der Forschungsprojekte am CO₂-Speicherstandort Ketzin gehörte die Entwicklung von neuen wissenschaftlich-technischen Grundlagen für eine sichere CO₂-Speicherung, um den CO₂-Injektions- und Ausbreitungsprozess zu beobachten, sowie Speicherrisiken abzuschätzen und zu minimieren. Zu den Forschungsinhalten gehörte ein umfangreiches Monitoringprogramm: Neben physikalischen, chemischen und mikrobiologischen Messungen in den Bohrungen und an der Erdoberfläche, sollten numerische Modelle entwickelt und Risikoabschätzungsstrategien erarbeitet werden (Schilling *et al.*, 2008).

Einen genaueren Überblick über die einzelnen Inhalte geben die nachstehenden Forschungsprojekte:

Das **europäische Forschungsprojekt CO₂SINK** (CO₂ Storage by Injection into a Natural Saline Aquifer at Ketzin, 2004 - 2010) umfasste die Entwicklung von wissenschaftlichen und technischen Grundlagen für eine sichere CO₂-Speicherung in poröse, salzwasserführende Sandsteine (saline Aquifere bzw. saline Grundwasserleiter). Es diente der Überwachung der Injektions- und Ausbreitungsprozesse mithilfe von Bohrloch- und Oberflächenmessungen sowie der Abschätzung und Minimierung von Speicherrisiken (Borm & Förster, 2005; Förster *et al.*, 2006).

Die im Rahmen dieser Arbeit aufgenommenen geoelektrischen Daten zur Überwachung der Installation, des Einbaus und der Zementation der Bohrlochelektroden, sowie zur Abbildung der CO₂-Ausbreitung im Untergrund am Pilotstandort Ketzin wurden im Zeitraum 05/2007 bis 05/2009 im Forschungsvorhaben CO₂SINK gewonnen.

Zur Realisierung des EU-Verbundvorhabens CO₂SINK schlossen sich 18 Partner aus Forschungseinrichtungen, Industrie und Universitäten aus neun europäischen Ländern zusammen. Die Projektkoordination lag beim Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum, GFZ. Es handelt sich hierbei um das erste CO₂-Speicherprojekt auf dem Festland (engl.: *onshore CO₂ storage*) in Europa (Schilling *et al.*, 2009).

Zahlreiche nationale Projekte ergänzten die Forschungsarbeiten am Pilotstandort Ketzin. Die technologische Entwicklung des geoelektrischen Bohrloch-Monitoringsystems (Kap. 4.1) wurde beispielsweise im Verbundprojekt **COSMOS** (CO₂ Storage, Monitoring and Safety Technology) mit einer Laufzeit von 2005 bis 2008 gefördert.

CO₂MAN (CO₂ Reservoir Management, 2010 - 2013) war das nationale Anschlussprojekt an CO₂SINK. Es beschäftigte sich neben dem Prozessverständnis der CO₂-Speicherung und dem fortführenden Monitoring auch mit dem Datenmanagement und der Öffentlichkeitsarbeit im Informationszentrum am Standort Ketzin (Martens *et al.*, 2015a).

Das europäische Forschungsprojekt **CO₂CARE** (CO₂ Site Closure Assessment Research, 2011 - 2013) hatte die Förderung des Datenaustausches von Demonstrationsprojekten zur CO₂-Speicherung zum Ziel (Martens *et al.*, 2012). Forschungsergebnisse von neun laufenden und stillgelegten Anlagen aus Australien (Otway), Deutschland (Ketzin), Frankreich (Montmiral, Rousse), Japan (Nagaoka), Niederlande (K12-B), Norwegen (Sleipner) und USA (Frio, Wallula) wurden in einer Datenbank zusammengefasst und der Wissenschaft zugänglich gemacht und als bewährter Leitfaden für Stilllegungsprozesse und dessen Langzeitsicherheit, sowie für behördliche Vorgaben und Zuständigkeitsübertragungen in Holloway *et al.* (2013) veröffentlicht.

Das Projekt **COMPLETE** (CO₂ post-injection monitoring and post-closure phase at the Ketzin pilot site) führte die Forschungsarbeiten (2014 - 2017) in der Phase nach Abschluss der CO₂-Injektion in Ketzin fort. Dieses Forschungsvorhaben sollte wesentliche Erkenntnisse zur Überwachung und zum Verhalten des CO₂-Speichers nach Beendigung der Injektion sowie Ergebnisse zur Stilllegung eines CO₂-Speichers liefern (Martens *et al.*, 2014).

3.2 Geologie und Lokation des Untersuchungsgebietes

3.2.1 Geologie des Untersuchungsgebietes

Das Messgebiet liegt im Nordostdeutschen Becken (engl.: *Northeast German Basin, NEGB*). Die untertägige CO₂-Speicherung erfolgte in Sandsteinhorizonte der Stuttgart-Formation (Abb. 3.1), die in der Südflanke des östlichen Teils der Doppelantiklinale Roskow-Ketzin liegen (Förster *et al.*, 2006). Die geologische Einheit der Stuttgart-Formation ist von Norddeutschland bis in den Stuttgarter Raum verbreitet. Ihre Sedimente wurden im Zeitalter der Trias vor rund 225 Millionen Jahren im mittleren Keuper abgelagert (Förster *et al.*, 2010). Die lithologisch heterogene Stuttgart-Formation besteht aus fluviatilen Rinnensandsteinen mit überwiegend guten Reservoireigenschaften. Diese liegen in Wechsellagerung mit feinkörnigen Überschwemmungs-Sedimenten mit überwiegend schlechten Reservoireigenschaften. Die Breite einer einzelnen fluvialen Sandsteinrinne kann von einigen zehn Metern bis zu mehreren hundert Metern variieren. Durch die Überlagerung einzelner Rinnen entstehen größere zusammenhängende Rinnensysteme (Förster *et al.*, 2006).

Sedimente des Mittleren Keupers des Norddeutschen Beckens sind hauptsächlich Beckensedimente terrestrischen Ursprungs, bestehend aus feinkörnigen klastischen Sedimenten wie Ton und Schluff wechsellagernd mit limnischen, chemischen und flachmarinen Sedimenten. Die feinkörnigen Ablagerungen der Grabfeld-Formation (Buntsandstein) werden von fluvialen, in Kerbtälern abgelagerten Sandsteinen innerhalb der Stuttgart-Formation (früher: Schilfsandstein-Schichten) unterbrochen, dominieren wieder in der Weser- und Arnstadt-Formation und gehen in flachmarin abgelagerte Sandsteine der Exter-Formation über. Die Rinnensandsteine innerhalb der Stuttgart-Formation kommen im gesamten Becken, allerdings mit stark unterschiedlichen Mächtigkeiten von einigen Metern bis einigen hundert Metern, vor (Beutler & Häusser, 1982).

Die rund 600 m mächtige Abfolge weiterer Sedimente (beispielsweise Tonsteine der Weser- und Arnstadt-Formation; jurassischen Sandsteine und tertiärer Ton) überlagert die geologische Einheit der Stuttgart-Formation und bildet ein Multibarrierensystem (Förster *et al.*, 2006).

Zu den beiden mesozoischen Hauptgrundwasserleitersystemen zählen die triassischen Sandsteine der Exter- und Stuttgart-Formation sowie die jurassischen Sandsteine. Sie weisen einen hohen Salzgehalt auf. Der tertiäre Rupelton wirkt als Grundwasserhemmer (Aquitarde) und trennt das Salzwasser (engl.: *brine*) der tieferen mesozoischen Grundwasserleiter (Aquifere) von den süßwasserführenden Grundwasserleitern aus flacheren Aquiferen des Quartärs bis Tertiärs (Förster *et al.*, 2006; Norden, 2011). Der

tertiäre Rupelton verhindert eine Versalzung des oberflächennahen, nutzbaren Grundwasservorkommens.

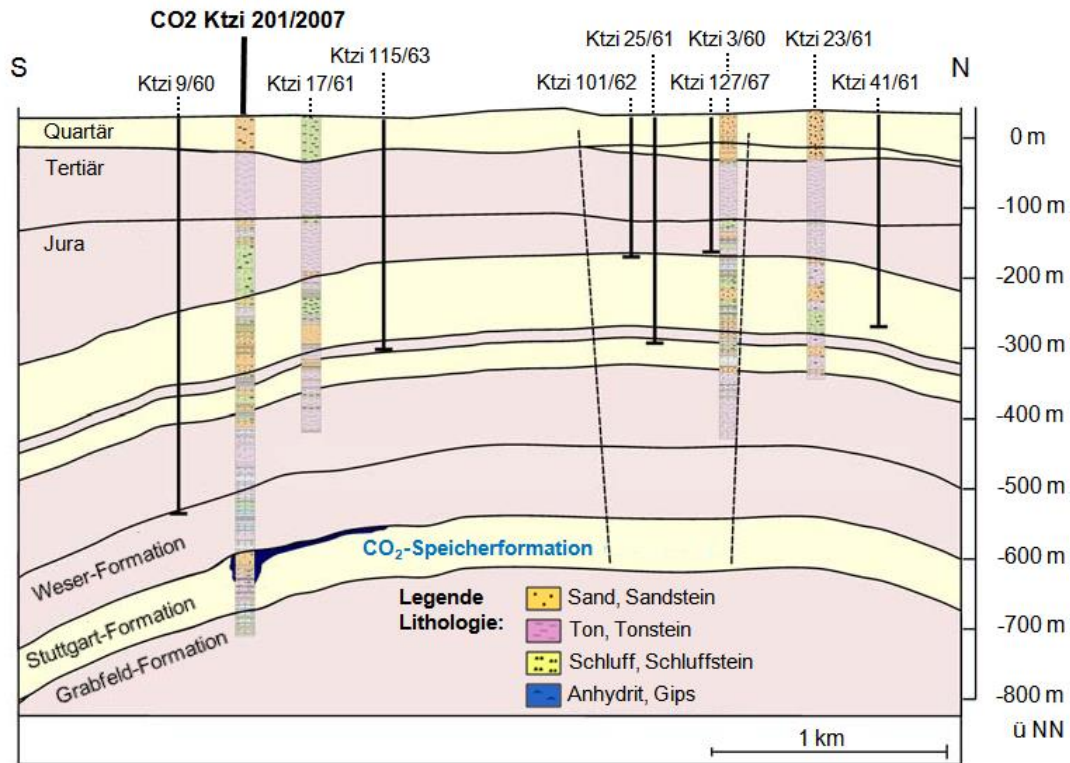


Abb. 3.1: Vereinfachte Darstellung der Geologie der Ketzin-Antiklinale (hellgelb) und der Aquitarde (rosa) nach Förster *et al.*, 2009. Die Lithologie ist für ausgewählte Altbohrungen und für die Injektionsbohrung Ktzi201 eingezeichnet. Die Hauptstörungszonen sind als schwarze Linien gekennzeichnet. Ein Szenario für eine vorhergesagte Ausdehnung nach 2,5 Jahren nach einer Injektion von rund 60.000 t CO₂ ist dunkelblau markiert.

3.2.2 Lokation und Standortwahl der drei Bohrungen

Die Pilotanlage zur untertägigen geologischen CO₂-Speicherung befindet sich nahe der brandenburgischen Ortschaft Ketzin und wird daher im Folgenden als „Pilotstandort Ketzin“ bezeichnet. Die Kleinstadt Ketzin liegt etwa 40 km westlich von Berlin und 15 km nordwestlich von Potsdam am nördlichen Ufer der Havel (Abb. 3.2a). Die Morphologie des Messgebietes ist schwach wellig bis eben, wobei die Höhenlagen der Geländeoberkante zwischen 25 und 55 m ü. NN liegen.

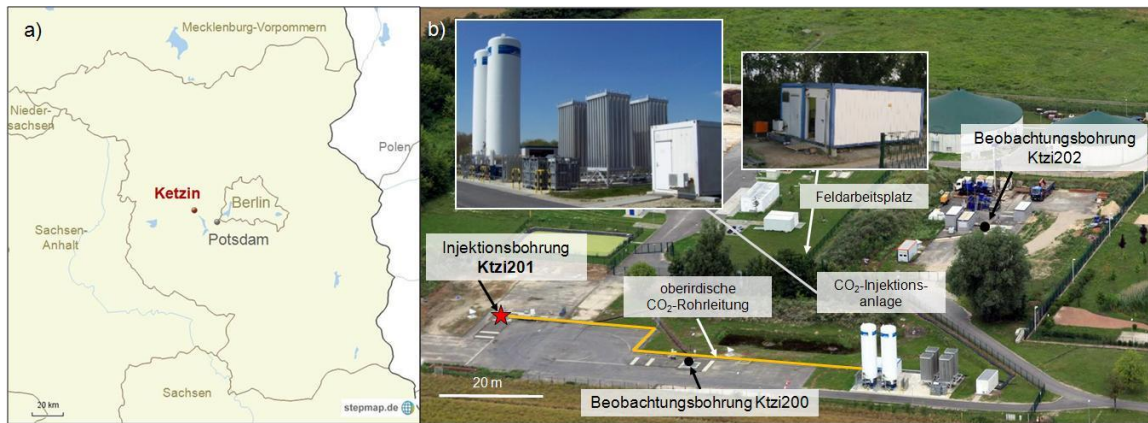


Abb. 3.2: a) Karte mit der geographischen Lage (Quelle: www.stepmap.de) und b) Luftbild der Pilotanlage Ketzin mit der Injektionsbohrung Ktzi201, den beiden Beobachtungsbohrungen Ktzi200 und Ktzi202, der CO₂-Injektionsanlage (Detailfoto, oben links) und dem Feldarbeitsplatz (Detailfoto, oben mitte) (nach Martens *et al.*, 2012).

Am Pilotstandort Ketzin erfolgte die CO₂-Speicherung in poröse Sandsteine der Stuttgart-Formation (620 bis 700 m (unter Geländeoberkante, u GOK)), die durch eine sattelförmige, in sich geschlossenen Aufwölbung (Antiklinalstruktur) von gering-durchlässigen Deckschichten (engl.: *caprock*) überlagert wird. Diese Sattelstrukturen sind natürlich begrenzte Reservoirs, für viele potentielle Speicherstandorte im zentraleuropäischen Beckensystem typisch und somit von besonderem Interesse für die CO₂-Untergrundspeicherung (Förster *et al.*, 2006). Die Pilotanlage Ketzin liegt im östlichen Teil der Doppelantiklinale Roskow-Ketzin, die oberhalb eines langgestreckten Salzkissens (in 1.500 bis 2.000 m Tiefe) liegt. Die Antiklinale streicht in NNO-SSW Richtung und ihre Flanken sind in einem Winkel von rund 15° einfallend. Das Salz wurde vor rund 255 Millionen Jahren im Perm abgelagert. Das Deckgebirge über dem Salz besteht aus Sedimentgesteinen der Trias (Buntsandstein, Muschelkalk und Keuper) sowie aus Sedimentgesteinen des Unterjura, Tertiär und Quartär (Förster *et al.*, 2006; Norden *et al.*, 2010). Durch die Auflast dieser überlagerten Sedimente (Hangendschichten) kam es zur Salzbewegung im Untergrund (Halokinese) und zur Bildung von Salzkissen und Salzstöcken (Diapire). Aufsteigendes Salz deformierte dabei die Hangendschichten und bildete Mulden (Synklinalen) und Aufwölbungen (Antiklinalen) aus.

Die Antiklinalstruktur (Ketzin-Antiklinale) wurde bereits in der Vergangenheit als Gasspeicher genutzt. In einem Aquifersystem über dem heutigen CO₂-Speicherbereich wurden jurassische Sandsteine in einer Teufe von 250 m bis 400 m (u GOK) fast 40 Jahre lang (von 1964 - 2000) als saisonaler Untertagegasspeicher (UGS) für Stadtgas und später für Erdgas genutzt. Die Rückbaumaßnahmen wurden 2005

abgeschlossen. Mithilfe seismischer 3D-Oberflächenmessungen im CO₂SINK-Projekt konnte die verbliebene Restgasverteilung dieses Speichers bestimmt werden (Juhlin *et al.*, 2007).

Die Firma Verbundnetz Gas (VNG AG) ist Eigentümer der Bergrechte zur Nutzung des unterirdischen Raumes am Standort Ketzin und stellt diese als Industriepartner dem Forschungsvorhaben zur CO₂-Speicherung zur Verfügung. Die am Standort des ehemaligen Untergrundspeichers Ketzin vorhandene Infrastruktur, die vorliegende Bergbauberechtigung und die günstigen geologischen Verhältnisse für die CO₂-Speicherung in größeren Tiefen (Stuttgart-Formation: 620 bis 700 m (u GOK)) machten die Antiklinalstruktur Ketzin als Standort für die Erforschung der CO₂-Speicherung und seine Überwachung interessant (Förster *et al.*, 2006; Schilling *et al.*, 2009). Es wurde davon ausgegangen, dass der triassische Speicherhorizont am Pilotstandort Ketzin folgende generelle Anforderungen an die untertägige CO₂-Speicherung erfüllt:

- Ausreichende Größe für eine Speicherung der geplanten CO₂-Menge
- Deckschichten im Hangenden, die eine CO₂-Vertikalmigration dauerhaft verhindern
- Reservoir mit effektiven Injektionsbedingungen für geeignete Injektionsraten und Injektionsmengen.

Aufgrund der Nutzung als ehemaliger Untergrundspeicher für Erdgas wurde das Gebiet um Ketzin bereits in den 60er Jahren mit geophysikalischen Messungen und Bohrungen intensiv erkundet. Unter anderem lieferten seismische und gravimetrische Messungen allgemeine Informationen zum strukturellen Aufbau der Ketzin-Antiklinale (Engelmann *et al.*, 2008).

Die 2005 im Rahmen des CO₂SINK-Projektes durchgeführten seismischen 3D-Oberflächenmessungen (Kap. 3.3.4) bestätigten und präzisierten die Ergebnisse der Messungen aus den 60er Jahren hinsichtlich des Strukturaufbaus des östlichen Teils der Doppelantiklinale Roskow-Ketzin und einer ost-west-streichenden Grabenstruktur (Juhlin *et al.*, 2007). Sie konnten keine Verwerfungen (tektonische Störungen) im nahen Umfeld der drei geplanten Bohrungen abbilden (Juhlin *et al.*, 2007) und bestätigten somit eine gute Standortwahl.

Eine große Anzahl von Altbohrungen wurde im Bereich der Roskow-Ketzin Doppelantiklinale niedergebracht. Im Bereich der Ketzin-Antiklinale sind bis 1998 insgesamt 346 Bohrungen niedergebracht worden, davon 81 Speicher-, 236 Erkundungs- und 29 Pegelbohrungen. Sie beschrieben die jurassischen Speicher-

horizonte und ihre tertiären Deckschichten und bildeten die Grundlage für eine Nutzung als Stadtgas- bzw. Erdgasspeicher (Engelmann *et al.*, 2008). Im Bereich der Roskow-Antiklinale wurden zwischen 1960 und 1966 insgesamt 23 Bohrungen niedergebracht. Zwischen dem jurassischen Speicherhorizont und dem tertiären Deckgebirge konnten hydrodynamische Verbindungen festgestellt werden und wiesen die jurassischen Sandsteine der Roskow-Antiklinale für eine Untergrundspeicherung als ungeeignet aus (Engelmann *et al.*, 2008). Lediglich fünf der vorhandenen Altbohrungen (Ug Ktzi 163/69, Ug Ktzi 6/70, Ug Ktzi 12/71, Ug Ktzi 32/71 und Ug Ktzi 38/71) durchteuften die Stuttgart-Formation. Die sich im Flankenbereich der Ketzin-Antiklinale befindende Bohrung Ug Ktzi 163/69 traf den Sandsteinaquifer der Zielformation mit einer Mächtigkeit von rund 30 m an (Förster *et al.*, 2006). Gute bis sehr gute Speichereigenschaften dieser Altbohrung, die durch hydraulische Tests bestimmt wurden, prognostizierten für die drei Bohrungen zur geologischen CO₂-Speicherung ebenfalls gute Chancen für entsprechend mächtige Sandsteinhorizonte mit guten Speichereigenschaften. Es wurde eine Reservoirtiefe von ca. 700 m mit Temperaturen von ca. 35 °C (Borm & Förster, 2005) erwartet. Aufgrund der vorherrschenden Druck- und Temperaturbedingungen oberhalb des kritischen Punktes (31,1 °C und 73,9 bar), würde das injizierte CO₂ dann in seiner superkritischen Phase vorliegen.

Im Rahmen des CO₂SINK-Forschungsprojektes wurden 2007 drei Bohrungen, zwei zur Beobachtung sowie eine zur Injektion und Beobachtung, abgeteuft. Die offiziellen Namen der drei Bohrungen lauten CO₂ Ktzi 200/2007, CO₂ Ktzi 201/2007 und CO₂ Ktzi 202/2007. Die Namen der Bohrungen wurden bergamtlich vergeben. Das Kürzel enthält jeweils den Zweck der Bohrung (CO₂ für das Verbringen von CO₂), den Namenskürzel des Gebietes (Ktzi für Ketzin), in dem die Bohrung abgeteuft ist, eine fortlaufende Nummer (200 für die erste Bohrung, 201 für die zweite und 202 für die dritte) sowie das Bohrjahr (2007). Im Folgenden wird auf den jeweils vollständigen Namen der drei Bohrungen verzichtet und ausschließlich die Kürzel Ktzi200 und Ktzi202 für die beiden Beobachtungsbohrungen und Ktzi201 für die Injektionsbohrung verwendet. Die Koordinaten der drei Bohrungen sind in der Tabelle 3.1 zusammengefasst.

An dieser Stelle sei erwähnt, dass 2011 eine weitere flache Grundwasser-Beobachtungsbohrung P300 (Hy Ktzi P300/2011) und 2013 die letzte Beobachtungsbohrung Ktzi203 (CO₂ Ktzi 203/2012) abgeteuft wurde (Martens *et al.*, 2013; Prevedel *et al.*, 2014). Da weder die Pegelbohrung P300 (rund 420 m tief) noch die Beobachtungsbohrung Ktzi203 (rund 700 m tief) für geoelektrische Messungen genutzt wurden und sie erst nach dem für diese Arbeit relevanten Messzeitraum (bis 05/2009) abgeteuft wurden, wird nicht weiter auf sie eingegangen.

Die Lage der drei Vertikalbohrungen zueinander wurde unter Berücksichtigung der erwarteten geologischen Verhältnisse, der physikalischen Grenzen der räumlichen Auflösung der unterschiedlichen Monitoringmethoden sowie unter Berücksichtigung der angestrebten CO₂-Injektionsmenge geplant (Prevedel *et al.*, 2008). Die Bohrungen Ktzi201 und Ktzi202 wurden als Beobachtungsbohrungen, die Bohrung Ktzi200 als Injektionsbohrung vorgesehen. Aufgrund von Problemen während der Zementation in der Bohrung Ktzi200 wurde entschieden, diese Bohrung nicht als Injektionsbohrung, sondern als Beobachtungsbohrung zu nutzen und stattdessen die Bohrung Ktzi201 als Injektionsbohrung zu komplettieren. Einzelheiten dazu sind in Kapitel 4.2 näher beschrieben. Die drei Bohrungen liegen an den Eckpunkten eines rechtwinkligen Dreiecks, mit der Bohrung Ktzi200 im rechten Winkel. Die Beobachtungsbohrungen Ktzi200 und Ktzi202 haben einen Abstand von 50 m und 112 m zu der Injektionsbohrung Ktzi201 (Abb. 3.2b). Die Tiefe der drei Bohrungen beträgt rund 800 m.

Die CO₂-Injektion begann im Juni 2008. Rund 18.000 t CO₂ wurden innerhalb des ersten Injektionsjahres in Ketzin zu Forschungszwecken gespeichert (Würdemann *et al.*, 2010). Nach dem zweiten Injektionsjahr waren rund 36.000 t CO₂ (Martens *et al.*, 2011), nach über drei Jahren rund 53.000 t CO₂ (Martens *et al.*, 2012) und nach dem vierten Injektionsjahr rund 61.400 t CO₂ (Martens *et al.*, 2013) im Untergrund gespeichert. Nach Beendigung der Injektion Ende August 2013 waren in Ketzin insgesamt rund 67.300 t CO₂ erfolgreich injiziert (Bergmann *et al.*, 2014; Szizybalski *et al.*, 2014).

Tab. 3.1: Gauß-Krüger-Koordinaten (Potsdam Datum, Bessel-Ellipsoid) der Injektionsbohrung Ktzi201 und der beiden Beobachtungsbohrungen Ktzi200 und Ktzi202. Die Höhen beziehen sich auf Werte über Normalnull (ü. NN).

	Rechtswert	Hochwert	Höhe in m (ü. NN)
Ktzi200	4559104	5817905	34
Ktzi201	4559053	5817903	34
Ktzi202	4559107	5818001	34

3.2.3 Bohrlochverlauf der drei Bohrungen

Die Bohrlochabweichungsmessung erlaubt die **exakte Bestimmung der Koordinaten** einer beliebigen Position in der Bohrung (z.B. der Endteufe) und ist somit auch für die exakte Bestimmung der Koordinaten der permanent installierten Vertikalelektroden

(Kap. 4.1) von Bedeutung. Weiterhin spielt sie bei der Berechnung der Vertikaltiefen (wahre Tiefen, engl.: *true vertical depth*, TVD; auf GOK bezogene Tiefen) der einzelnen Schichten, insbesondere der exakten Lage und Mächtigkeit der Speicherhorizonte eine entscheidende Rolle.

Besonders einfallende Schichten mit wechselnder Gesteinshärte bewirken immer eine Ablenkung des Bohrmeißels und damit eine gewisse Richtungsabweichung von Bohrungen (zur Vertikalen). Am Standort Ketzin liegen flach einfallende Schichten mit stark wechselnden Porositätsverhältnissen und schwankendem Tongehalt vor (Kap. 3.2.1 und Kap. 3.3.2). Häufig treten bei flach einfallende Schichten wechselnder Härte und/ oder bei geschieferten Gesteinen Ablenkungen des Bohrmeißels gegen die Schichteinfallsrichtung auf. Selbst bei einer sorgfältig ausgeführten vertikalen Bohrungen und günstigen Gebirgsverhältnissen kann die Vertikalabweichung bis zu 5° betragen (Prinz & Strauß, 2011). Da bereits diese geringen Vertikalabweichungen zu großen Positionierungsfehlern der Elektroden in der Installationstiefe und somit zu erheblichen Einflüssen bei den geoelektrischen Messungen führen, ist eine genaue Bestimmung des Bohrlochverlaufes und der damit verbundenen Position der Elektroden im Bohrloch notwendig.

Deshalb wurden Messungen zur Bohrlochorientierung durchgeführt (Bohrlochabweichungsmessungen). Sie dienten der Bestimmung des tatsächlichen Verlaufes einer Bohrung. Dazu wurde in die Bohrung eine Sonde eingeführt, die folgende Orientierungswerte lieferte (Fricke & Schön, 1999):

- Neigung (engl.: *deviation*; Inklinaton, Winkel zur Vertikalen) und
- Richtung (Azimut, Richtungswinkel zu magnetisch Nord)

des Bohrloches sowie

- Länge der Bohrung.

Die Bohrlochabweichungsmessungen am Pilotstandort Ketzin erfolgten quasi-kontinuierlich in Tiefschritten von 0,10 m. Die Bohrlochabweichungen der Bohrungen Ktzi200, Ktzi201 und Ktzi202 am Pilotstandort Ketzin sowie die Lage des Zielhorizontes für die CO₂-Speicherung und dessen Mächtigkeit sind in Tabelle 3.2 nach Rinke (2007a, b, c) zusammengefasst. Der Bohrlochverlauf wird als Polygon berechnet und lässt sich für jede Bohrung in einem Horizontal- und einem Vertikalschnitt als Projektion darstellen.

Abbildung 3.3 fasst die Vertikalprojektionen (a) und die Horizontalprojektionen (b) für die Injektionsbohrung Ktzi201 und die beiden Beobachtungsbohrungen Ktzi200 und Ktzi202 für die Tiefenbereiche des permanent installierten Vertikalelektrodensystems (engl.: *Vertical Electrical Resistivity Array, VERA*) zusammen.

In den Beobachtungsbohrungen Ktzi200 und Ktzi202 lagen keine absoluten Orientierungswerte vor. Im obersten Bohrabschnitt (Ktzi200: 0 bis 165 m, Ktzi202: 0 bis 171 m) konnte keine Messung des Bohrlochazimutes erfolgen, da sich der oberste Bohrlochabschnitt als instabil herausstellte. Für diese Teufenbereiche wurde jeweils ein konstantes Bohrlochazimut angenommen. Der Fehler des relativen Verlaufs der Beobachtungsbohrungen kann mit maximal 0,30 m bis 0,50 m abgeschätzt werden (Kück, persönliche Mitteilungen, 2012). In der Injektionsbohrung Ktzi201 lagen ab einer Teufe von 55 m Bohrlochazimutwerte vor.

Tab. 3.2: Zusammenstellung der Bohrlochverlaufsabweichungen der Bohrungen Ktzi200, Ktzi201 und Ktzi202 zur Vertikalen und der jeweiligen Lage des geologischen Zielhorizontes (nach Rinke, 2007a, b, c).

	Beobachtungsbohrung Ktzi200	Injektionsbohrung Ktzi201	Beobachtungsbohrung Ktzi202
Endteufe (u GOK) (u NN)	810 m 776 m	755 m 721 m	750 m 716 m
Bohrlochabweichung bei Endteufe	7,24 m (bei 319°)	0,49 m (bei 329°)	4,83 m (bei 28°)
Teufenreduktion bei Endteufe	0,08 m	0,04 m	0,07 m
Zielhorizont Stuttgart- Formation (u GOK)	630 m – 701 m	629 m – 703 m	622 m – 695 m
Mächtigkeit des Zielhorizontes	71 m	74 m	73 m

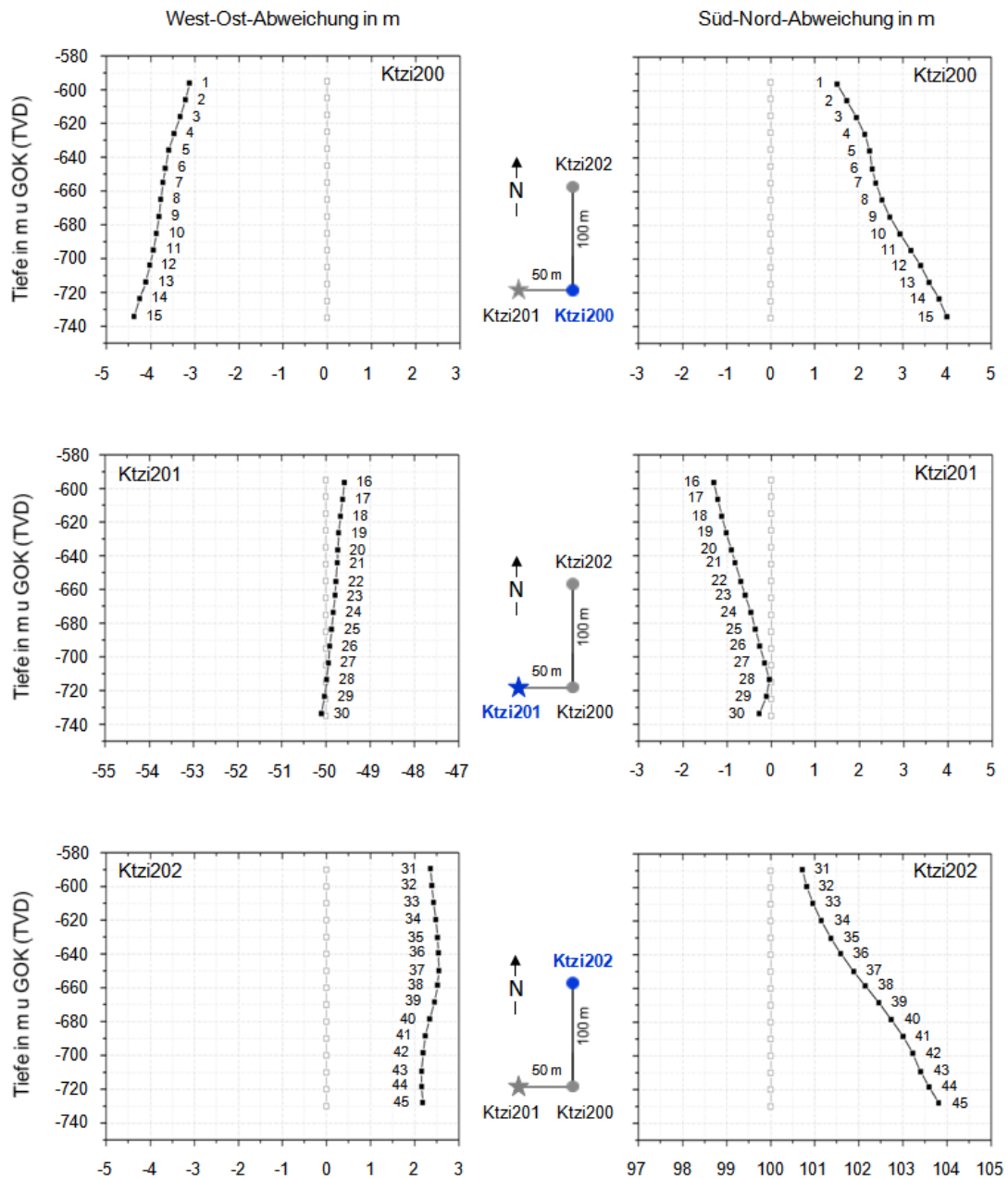


Abb. 3.3a: Ergebnisse der Bohrlochabweichungsmessung (Daten nach Rinke, 2007a, c) der Injektionsbohrung Ktzi201 (mitte) und der beiden Beobachtungsbohrungen Ktzi200 (oben) und Ktzi202 (unten), dargestellt jeweils als Vertikalprojektionen im W-E-Schnitt (links) und im S-N-Schnitt (rechts) für die Tiefenbereiche (TVD) des installierten VERA-Systems (schwarz: exakte Elektrodenposition, grau: vereinfachte Elektrodenposition).

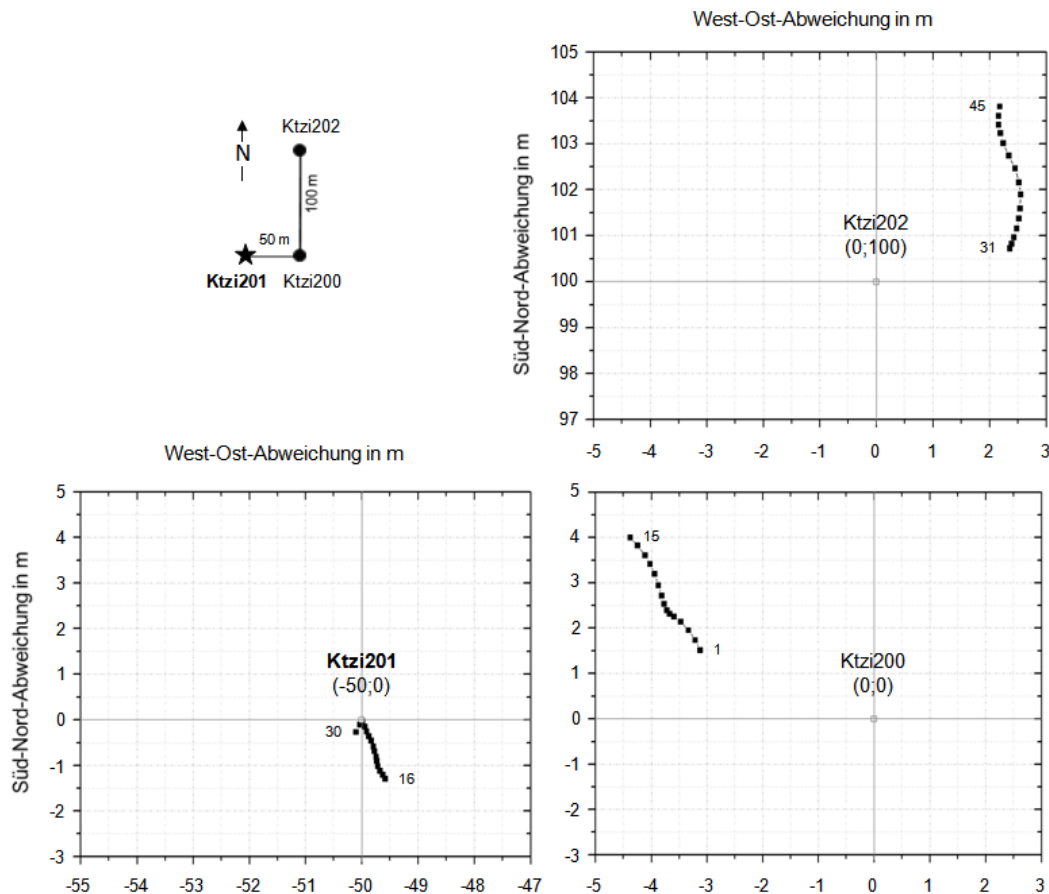


Abb. 3.3b: Ergebnisse der Bohrlochabweichungsmessung (Daten nach Rinke, 2007a, c) der Injektionsbohrung Ktzi201 (unten links) und der beiden Beobachtungsbohrungen Ktzi200 (unten rechts) und Ktzi202 (oben rechts), dargestellt jeweils als Horizontalprojektion für die Tiefenbereiche (TVD) des installierten VERA-Systems (schwarz: exakte Elektrodenposition, grau: vereinfachte Elektrodenposition).

Ist der Bohrlochverlauf vollständig bekannt, können die Koordinaten leicht aus der relativen Tiefenlage (d.h. aus dem Abstand zwischen den Elektroden entlang der isolierten Verrohrung) errechnet werden. Aufgrund von oberflächennahen Bohrlochinstabilitäten konnten in Ketzin in diesem Bereich keine Abweichungsmessungen durchgeführt werden. Der Verlauf wurde abgeschätzt. Die Bohrlochabweichungen der drei Bohrungen (Tab. 3.2) betrugen in der jeweiligen Endteufe für Ktzi201 7,24 m (810 m (u GOK)), für Ktzi200 lediglich 0,49 m (755 m (u GOK)) und für Ktzi202 4,83 m (750 m (u GOK)). Für die Elektroden ergaben sich Tiefenabweichungen von bis zu zwei Metern. Wird die Bohrlochabweichung bei der Datenauswertung nicht berücksichtigt, ergeben sich Geometriefehler. Sie entstehen aufgrund der Abweichung der wahren Position der Vertikalelektroden von den **theoretischen Elektrodenpositionen (vereinfachte Koordinaten)**, siehe Labitzke *et al.*, 2012). Die vereinfachten Elektrodenpositionen sind in der Abbildung 3.3a zum besseren Vergleich grau hinterlegt.

3.2.4 Lithologie am Pilotstandort

3.2.4.1 Stuttgart-Formation

Die sedimentäre Abfolge der am Pilotstandort Ketzin erbohrten Stuttgart-Formation besteht vor allem aus Ton-, Schluff- und Sandstein (Förster *et al.*, 2009). Im oberen Bereich der Stuttgart-Formation befinden sich jeweils die größten zusammenhängenden Sandsteinabfolgen, dessen Tiefenlage und Mächtigkeiten für alle drei Bohrungen in Tabelle 3.3 nach Norden (2007a, b, c) zusammengefasst sind. Die Sandsteinstrukturen in den Bohrprofilen der Beobachtungsbohrung Ktzi200 und der Injektionsbohrung Ktzi201 sind sich sehr ähnlich und gehören vermutlich zur selben Rinne, während die Sandsteinintervalle des Profils der Beobachtungsbohrung Ktzi202 deutlich gering mächtiger und in geringeren Tiefen anzutreffen sind. Ob sie derselben Rinne angehören, lässt sich dabei nur schwer beurteilen (Wiese *et al.*, 2010). Wenn dem so ist, sind die Sandsteinschichten des Speicherhorizontes nach Norden (Richtung Ktzi202) aufgewölbt. Die petrophysikalischen Eigenschaften wurden in hydraulischen Tests in den Bohrungen (Wiese *et al.*, 2010) sowie in Labormessungen an den Bohrkernen (Kap. 3.3.2) bestimmt. Die lithostratigraphische Einteilung der CO₂-Speicherhorizonte der Stuttgart-Formation ist anhand der geologischen Bohrprofile der Injektionsbohrung Ktzi201 und der beiden Beobachtungsbohrungen Ktzi200 und Ktzi202 in Abbildung 3.4 zusammengefasst.

Tab. 3.3: Zusammenstellung der Tiefenlage und Mächtigkeiten der größten zusammenhängenden Sandsteinabfolge im oberen Bereich der Stuttgart-Formation (nach Norden, 2007a, b, c).

	Beobachtungsbohrung Ktzi200	Injektionsbohrung Ktzi201	Beobachtungsbohrung Ktzi202
Tiefenlage der Sandsteinabfolge (u GOK)	633 m – 649 m	633 m – 651 m	627 m – 636 m
Mächtigkeit der Sandsteinabfolge	16 m	18 m	9 m

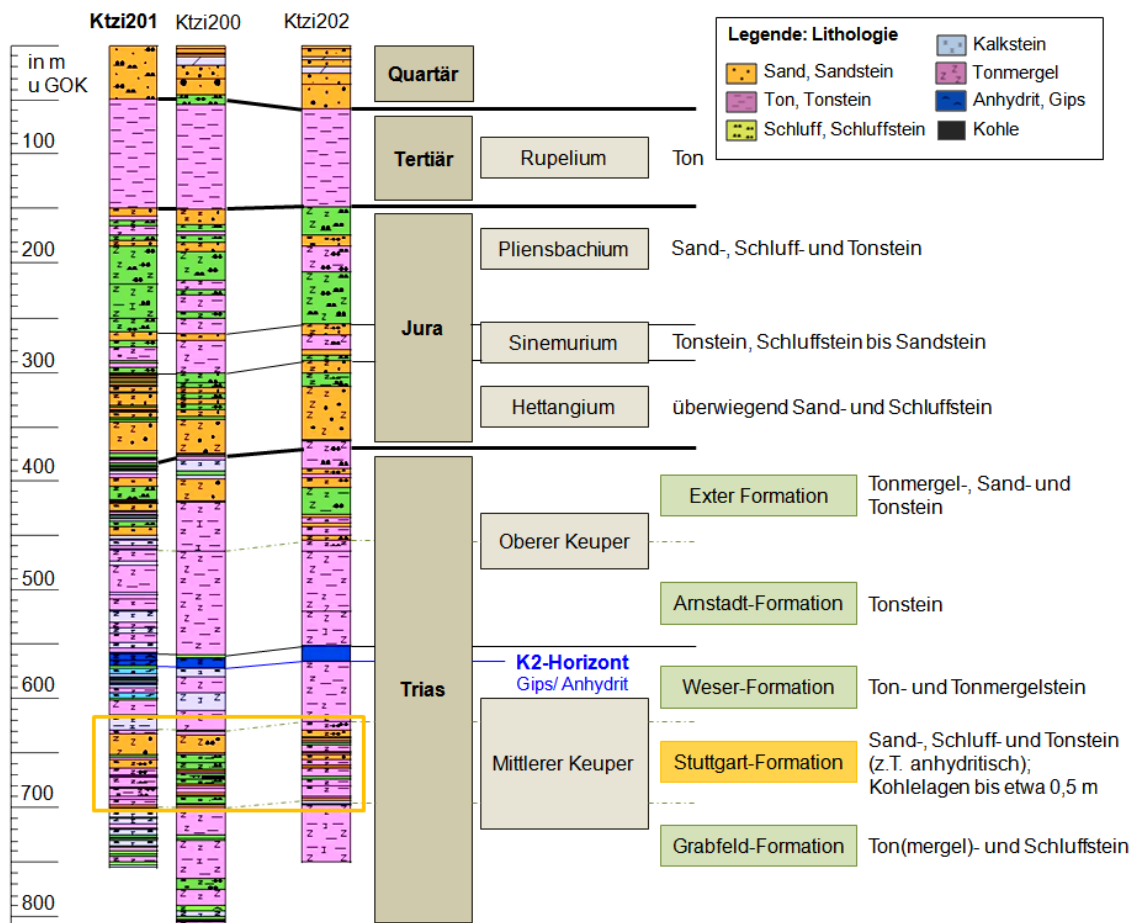


Abb. 3.4: Geologische Bohrprofile (nach Norden, 2007a, b, c) der Injektionsbohrung Ktzi201 (links) und der beiden Beobachtungsbohrungen Ktzi200 und Ktzi202 (mitte und rechts) mit Eingliederung in die geologische Zeitskala (nach Prevedel *et al.*, 2008; Norden *et al.*, 2010 und Förster *et al.*, 2010). Der Speicherhorizont liegt in der Stuttgart-Formation (gelb hervorgehoben). Der seismische Reflexionshorizont (K2-Reflektor) ist blau markiert.

Die 10 - 20 m mächtige Gips-/ Anhydritschicht wird als Heldburg-Gips bezeichnet und ist die Obergrenze der Weser-Formation. Sie stellt einen deutlichen seismischen Reflektor dar und wird als K2 Reflektor bezeichnet. Er befindet sich rund 80 m oberhalb der Stuttgart-Formation (Förster *et al.*, 2006; Juhlin *et al.*, 2007).

Die Daten der seismischen 3D-Oberflächenmessungen von 2005 lieferten wichtige Erkenntnisse zum Verlauf der Rinnensandsteine am CO₂-Speicherstandort. Kazemeini *et al.* (2009) und Norden & Frykman (2013) ermittelten den Verlauf der Rinnensandsteinschichten in Reservoirtiefe im nahen Umfeld der drei Bohrungen in NW-SE Richtung, während die Rinne in rund 1.000 m Entfernung in nördlicher Richtung einen N-S-Verlauf anzeigte und dann in einen NE-SW-Trend noch weiter nördlich überging. Somit ist auch eine CO₂-Ausbreitung innerhalb des salinen Sandsteinaquifers in NW-SE Richtung zu erwarten.

3.2.4.2 Geologische Deckschichten

Die Deckschichten (Caprock) über den Sandsteinhorizonten der Stuttgart-Formation bilden ein Multibarrierensystem, das ein Aufsteigen und Entweichen des injizierten CO₂ verhindert (strukturelle CO₂-Rückhaltung, Kap. 2.2). Die erste Deckschicht bilden die etwa 165 m mächtigen Tonsteinabfolgen der Weser- und Arnstadt-Formation. Die darüber folgenden jurassischen Sandsteine wurden am Standort Ketzin in der Vergangenheit für eine industrielle Untertagegasspeicherung von Stadt- und Erdgas genutzt. Der ehemalige Gasspeicher (in einer Tiefe von 250 - 400 m) wird von einer abdichtenden Deckschicht aus tertiärem Ton (Rupelton) überlagert. Er liegt in einer Tiefe von rund 50 - 150 m und bildet gleichzeitig die oberste Deckschicht des Multibarrierensystems über den Sandsteinen der Stuttgart-Formation (Förster *et al.*, 2006).

3.2.5 Zusammenfassung der Standorteignung: Ketzin als CO₂-Speicherstandort

Ketzin wurde als Standort für das erste europäische CO₂-Speicherprojekt auf dem Festland als geeignet befunden.

Die Pilotanlage liegt im Nordostdeutschen Becken und hat aufgrund des häufigen Vorkommens an salinen Aquiferen das größte Speicherpotential in Deutschland. Der hohe Salzgehalt der salinen Aquifere macht eine Trinkwassernutzung unmöglich. Daher sind sie wirtschaftlich uninteressant und bieten sich als künstlich genutzte CO₂-Speicher an.

Ein natürliches Multibarrierensystem mit Deckschichten über dem Speichergestein verhindert in Ketzin das Aufsteigen und Entweichen des injizierten CO₂. Das beweist auch die erfolgreiche Langzeit-Nutzung jurassischer Sandsteine für eine industrielle Untertagegasspeicherung von Stadt- und Erdgas, die oberhalb der tiefliegenden, porösen Sandsteinschichten der Stuttgart-Formation erfolgte und damit die Dichtheit und Langzeitsicherheit des Reservoirs bei der CO₂-Speicherung vorab belegt.

Die Firma Verbundnetz Gas ist Eigentümer der Bergrechte zur Nutzung des unterirdischen Raumes am Standort Ketzin. Als Industriepartner stellt sie diese dem Forschungsvorhaben zur CO₂-Speicherung zur Verfügung. Die am Standort des ehemaligen Untergrundspeichers Ketzin vorhandene Infrastruktur, die vorliegende Bergbauberechtigung und die günstigen geologischen Verhältnisse für eine CO₂-Speicherung in größeren Tiefen machten Ketzin als Standort für die Erforschung und Überwachung der CO₂-Speicherung interessant.

Anhand seismischer Messungen konnten tektonischen Störungen als Risiko für natürliche Leckagen im nahen Umfeld des Reservoirs ausgeschlossen werden. Die Daten lieferten wichtige Erkenntnisse zum Verlauf der Rinnensandsteine in NW-SE Richtung im nahen Umfeld der drei Bohrungen.

Durch umfangreiche Vorerkundungen lagen bereits zahlreiche geologische Daten zum Speicherstandort vor. Es wurde eine ausreichend große Porosität der Sandsteine der Stuttgart-Formation erwartet. Dies bedeutete eine hohe CO₂-Speicherkapazität. Zudem wurde eine ausreichend große Permeabilität erwartet. Das zeigt, dass die Speichergesteine für Flüssigkeiten und Gase eine hohe Durchlässigkeit besitzen. Folglich steigt der Fluiddruck am Injektionspunkt im Untergrund aufgrund der CO₂-Injektion nicht wesentlich an. Somit wird weder die injizierbare CO₂-Rate noch die CO₂-Speichermenge begrenzt, um unnötige Druckanstiege im Reservoir zu vermeiden.

Eine große Speichertiefe bedingt hohe Temperatur- und Druckwerte. Es wurde eine Reservoirtiefe von ca. 700 m bei einer Temperatur von ca. 35 °C (Borm & Förster, 2005), d.h. mit vorherrschenden Druck- und Temperaturbedingungen oberhalb des kritischen Punktes (31,1 °C und 73,9 bar), erwartet. Das injizierte CO₂ wäre somit superkritisch. Als superkritisches Fluid liegt CO₂ in seiner dichtesten Phase vor und benötigt wesentlich weniger Porenvolumen als beispielsweise seine Gasphase. Es wird weniger Speicherplatz im Untergrund benötigt. Somit kann mehr superkritisches CO₂ als gasförmiges CO₂ in einem Reservoir der gleichen Ausdehnung gespeichert werden.

3.3 Bohrkernuntersuchungen und Monitoringmethoden

Neben geoelektrischen Verfahren wurden am Pilotstandort Ketzin allgemein physikalische, chemische und mikrobiologische Verfahren eingesetzt. Sie dienen der Überwachung des Speicherhorizontes und der darüber liegenden Deckschichten vor, während und nach der CO₂-Injektion (Giese *et al.*, 2009; Schilling *et al.*, 2008; Würdemann *et al.*, 2010; Martens *et al.*, 2011; Martens *et al.*, 2012; Liebscher *et al.*, 2012).

In den folgenden Unterkapiteln wird eine Auswahl von Voruntersuchungen und Monitoringmethoden mit ihren Ergebnissen vorgestellt. Sie werden zur Interpretation und Diskussion der geoelektrischen Ergebnisse in den Kapiteln 4 und 5 herangezogen.

Folgende Voruntersuchungen und Methoden werden in den nachstehenden Unterkapiteln vorgestellt:

- Gewinnung von Bohrkernen und ihre Gesteinsansprache
- Laboruntersuchungen an Bohrkernen
 - Widerstands-Bohrlochmessungen
 - Aktives seismisches Monitoring
 - Temperaturmonitoring
 - Geochemisches Monitoring
 - Weitere Monitoringmethoden.

Die Monitoringmethoden in Ketzin zählen zu den umfangreichsten und innovativsten Methoden, die bei der CO₂-Speicherung weltweit eingesetzt werden.

3.3.1 Gewinnung von Bohrkernen und ihre Gesteinsansprache

Am Pilotstandort Ketzin wurden zur detaillierten lithologischen Beschreibung in allen drei Bohrungen Bohrkern mit einer Gesamtlänge von rund 200 m aus den relevanten Sandsteinformationen gewonnen (Förster *et al.*, 2009; Norden *et al.*, 2010). Tabelle 3.4 fasst die Tiefen der gewonnenen Bohrkern, die Gesamtkernstrecken und den Kerngewinn aller drei Bohrungen zusammen. Zum kontinuierlichen Kernen (Gewinnung der Bohrkernproben) wurde das Seilkernrohrverfahren angewandt. Bei diesem Verfahren wird das erbohrte Gestein in einem Innenkernrohr mit einem Seil an die Geländeoberfläche gezogen, während Bohrgestänge und Bohrmeißel im Bohrloch verbleiben (Prinz, 1997; Buja, 2011). Die Bohrspülung wird zwischen Innen- und Außenrohr in die Tiefe geleitet und tritt erst an der Bohrkrone mit dem Kern in Kontakt. Somit wird der Kern nur einer geringen Ausspülung ausgesetzt und es kann eine hohe Kernqualität und Kernaussbeute erzielt werden. Im Feldlabor wurden Gamma-Dichtemessungen an den Bohrkernen durchgeführt und mit den Ergebnissen im Bohrloch korreliert, um die Tiefenlagen der einzelnen Kernsektionen zu bestimmen. Dies ermöglichte eine optimierte Festlegung der Lage der Filterbereiche im Reservoirbereich, durch die das CO₂ ins Reservoir injiziert werden sollte (Prevedel *et al.*, 2008). Mithilfe der Kernansprache, der Untersuchung der Spülproben (alle 1 - 5 m) und der Ergebnisse der geophysikalischen Bohrlochmessungen wurden die geologischen Profile der Injektionsbohrung Ktzi201 und der beiden Beobachtungsbohrungen Ktzi200 und Ktzi202 erstellt (Abb. 3.4).

Tab. 3.4: Zusammenfassung der Tiefen der gewonnenen Bohrkernproben für die drei Bohrungen, sowie jeweils Länge der Kernstrecke und Kerngewinn.

	Beobachtungsbohrung Ktzi200	Injektionsbohrung Ktzi201	Beobachtungsbohrung Ktzi202
Tiefen der Bohrkernproben (u GOK)	610 m - 709,6 m	620 m - 703,5 m	626 m - 644,5 m
Kerngewinn aus			
- Weser-Formation	20 m	10 m	
- Stuttgart-Formation	73 m	70 m	18,5 m
- Grabfeld-Formation	7 m	3 m	
Kernstrecke	99,6 m	83,5 m	18,5 m
Kerngewinn	96,7 m (96,1 %)	83,5 m (100 %)	18,5 m (100 %)

Die Bohrkern wurden in umfangreichen Laborexperimenten auf ihre petrophysikalischen Eigenschaften untersucht, die im folgenden Unterkapitel 3.3.2 beschrieben sind.

3.3.2 Laboruntersuchungen an Bohrkernen

Porositäts- und Permeabilitätsuntersuchungen an den Sandsteinen aus dem Reservoirbereich sollten zur Abschätzung geeigneter CO₂-Injektionstiefen beitragen und die Tiefenabhängigkeit dieser Gesteinseigenschaften untersuchen. Die sandigen Bereiche der Stuttgart-Formation zeigten eine sehr heterogene Verteilung der Porositäten (5 % bis > 35 %) und Permeabilitäten (0,02 mD bis > 5.000 mD) aufgrund von Unterschieden in den Korngrößen, der Fazies oder der Gesteinszementation (Norden *et al.*, 2010). Die besten Reservoirseigenschaften zeigten die Rinnensandsteine (engl.: *channel sandstones*) mit Porositäten zwischen 20 - 25 % und durchschnittlichen Permeabilitäten von 500 mD der oberen Rinnensandsteine und von 1.300 mD der unteren (Förster *et al.*, 2010). Ausgenommen waren dabei stark zementierte Sandsteinbereiche. Die meisten der im Labor untersuchten Sandsteinproben der Beobachtungsbohrung Ktzi200 wiesen Porositäten von rund 30 % und Permeabilitäten von rund 800 mD auf, während Sandsteinproben der Injektionsbohrung Ktzi201 zwar ähnliche Porositäten, aber geringere Permeabilitäten von rund 300 mD zeigten (Norden *et al.*, 2010).

Zur Charakterisierung der Mineralzusammensetzung wurden an zahlreichen Kernen (vor allem an Sandsteinen und Schluffsteinen) Untersuchungen mittels Röntgendiffraktometrie (engl.: *X-ray diffraction*, *XRD*) durchgeführt. Die XRD-Daten der Sandsteinproben der Stuttgart- Formation aus der Bohrung Ktzi200 und Ktzi201 wiesen auf ähnliche Sandsteinzusammensetzungen hin. Während der Quarzanteil beispielsweise bei 35 - 39 Gew.-% und der von Feldspat bei rund 20 Gew.-%, variierte der Anteil der Tonminerale (Illite) von rund 13 - 18 Gew.-% (Förster *et al.*, 2009; Norden *et al.*, 2010). Im Tiefenbereich des Sandsteinreservoirs waren in Ktzi200 vorwiegend Tonsteine vorhanden, während in Ktzi202 vorwiegend Feinsandsteine angetroffen wurden (Norden, 2007a, c).

Die Werte der, unter Normalbedingungen im Labor gemessenen, Gesteinseigenschaften können von denen aus Bohrlochmessungen (in-situ Bedingungen) bestimmten Werten aufgrund der unterschiedlichen Druck- und Temperaturbedingungen abweichen (Hatzsch, 1994). Deshalb fanden am Pilotstandort Ketzin auch Labormessungen an Kernen unter in-situ Bedingungen statt (siehe Kummerow & Spangenberg, 2011; Kap. 2.3.3.2).

3.3.3 Widerstands-Bohrlochmessungen

Durch Widerstands-Bohrlochmessverfahren sollten die spezifischen elektrischen Widerstände der durch die Bohrspülung infiltrierten Zone sowie der einzelnen von der Bohrung durchteuften Gesteinsschichten (nichtinfiltriertes Gebirge) kontinuierlich mit der Tiefe bestimmt werden. Mit Kenntnis der spezifischen elektrischen Widerstände können Schichtgrenzen festgelegt und Aussagen über die lithologische und gesteinsphysikalische Beschaffenheit der Schichten gemacht werden (Hatzsch, 1994).

Widerstands-Messverfahren sind nur im spülungsgefülltem (elektrisch leitend) und üblicherweise nur im unverrohrten Bohrloch (engl.: *open hole*) durchführbar (Bender, 1984). Die Spülung hat einen starken Einfluss auf die Bohrlochmessung. Einerseits ermöglicht sie die elektrische Verbindung zwischen Elektrode und Gebirge (Ankopplung), zum anderen verkompliziert sie den Stromfluss oder führt zu Störsignalen. Die Spülungszusammensetzung variiert je nach den bohrtechnischen Anforderungen und den geologischen Bedingungen und damit auch ihr Einfluss auf die elektrischen Eigenschaften und die Widerstandsmessung im Bohrloch selbst. Die Spülungswerte werden deshalb bei jeder Bohrlochmessung gemessen und in die Auswertung einbezogen (Hatzsch, 1994).

Am Pilotstandort Ketzin wurden vor dem CO₂-Injektionsbeginn in der Bohrung Ktzi201 Laterologs mit dem HRLA (High-Resolution Laterolog Array tool) und in den beiden Bohrungen Ktzi200 und Ktzi202 Dual-Laterologs (DLL, gerichtete Widerstandsmessungen) durchgeführt. Eine zeitliche Einordnung der Widerstands-Bohrlochmessungen, die einzelnen Messparameter und die Tiefenbereiche, in denen die Messungen stattfanden, sind in Tabelle 3.5 für jede der drei Bohrungen zusammengefasst. Für diese Arbeit waren nur die Tiefenbereiche, in denen sich das Vertikalelektrodensystem (590 m bis 735 m (u GOK), Kap. 4.1) für das geoelektrische Monitoring fand, von Interesse. Die Widerstands-Bohrlochmessungen wurden ausschließlich im unverrohrten Bohrloch durchgeführt.

Tab. 3.5: Zeitliche Einordnung der Widerstands-Bohrlochmessungen in den drei Bohrungen im unteren Bohrlochbereich, sowie Zusammenstellung der genutzten Widerstandsmessgeräte, der Messparameter, der Spülungswerte und der Tiefenbereiche (u GOK), in denen die Messungen stattfanden.

	Beobachtungs- bohrung Ktzi200	Injektions- bohrung Ktzi201	Beobachtungs- bohrung Ktzi202
Datum der Messung	03.05.2007	02.07.2007	15.08.2007
Art der Messung	DLL	HLRA	DLL
Tiefenbereich (u GOK)	585 m – 809 m	551 m – 757 m	575 m – 749 m
Messparameter	Spezifischer elektrischer Gesteinswiderstand aus Messungen mit großer (R_{deep}) und geringer (R_{shallow}) Eindringtiefe (in Ωm)		
		großer (HRLA5) bis geringer (HRLA1) Eindringtiefe (in Ωm)	großer (R_{deep}) und geringer (R_{shallow}) Eindringtiefe (in Ωm)
Messpunktabstand	0,05 m	0,15 m	0,05 m
Spez. el. Widerstand der Bohrspülung	0,08 Ωm (bei $\vartheta = 22^\circ\text{C}$)	0,162 Ωm (bei $\vartheta = 21^\circ\text{C}$)	0,18 Ωm (bei $\vartheta = 29^\circ\text{C}$)

Die verwendete Dual Laterolog (DLL) Sonde besitzt übereinander zwei Laterolog-3 Anordnungen mit unterschiedlich langen Schutzelektroden. Ein Laterolog-3 besteht dabei aus einer zentralen Stromelektrode (Mittlelektrode) und zwei flankierenden zylindrischen Schutzelektroden unterschiedlicher Länge. Der Strom wird senkrecht zur zylindrischen Mittlelektrode und damit seitlich ins Gebirge geleitet. Da die Eindringtiefe proportional zur jeweiligen Länge der Schutzelektroden ist, können gleichzeitig zwei Widerstandsprofile mit jeweils großer (Dual Laterolog Deep, *DLLd*, lange Schutzelektrode) und geringer (Dual Laterolog Shallow, *DLLs*, kurze Schutzelektrode) Eindringtiefe gemessen werden (Hatzsch, 1994).

Das HRLA ist ein weiterentwickeltes Laterolog System, bestehend aus einer zentralen, zylindrischen Stromelektrode (Mittlelektrode) und jeweils sechs ringförmigen Steuer- bzw. Spannungselektroden ober- und unterhalb. Wechselnde Belegungen der Steuer- bzw. Spannungselektroden und ihre gegenseitige Entfernung bei den Messungen liefern fünf Widerstandsprofile mit zunehmender Eindringtiefe sowie den spezifischen elektrischen Widerstand der Bohrspülung bzw. des Bohrkleins (engl.: *mud resistivity*) (Schlumberger, 2000; Hatzsch, 1994).

Die Widerstandsprofile (HRLA2 und HRLA5) der Laterologs in der Injektionsbohrung Ktzi201 sind in Abbildung 3.5 und die beiden Widerstandsprofile (*DLLd* und *DLLs*) der Dual Laterologs in den Beobachtungsbohrungen Ktzi200 und Ktzi202 sind in Abbildung 3.6 dargestellt. Die Eindringtiefe einer HRLA2-Messung entspricht dabei der der *DLLd*-Messung und die Eindringtiefe einer HRLA5-Messung der der *DLLs*-Messung. Die mittleren Gesteinswiderstände der Sandsteinhorizonte der Injektionsbohrung Ktzi201 ($z = 633 - 651$ m (u GOK)) betragen rund $0,8 \Omega\text{m}$ (Abb. 3.5). Die mittleren Gesteinswiderstände der Sandsteinhorizonte der Bohrung Ktzi200 ($z = 633 - 649$ m (u GOK)) betragen rund $0,4 \Omega\text{m}$. Die beiden Widerstandsprofile in Ktzi200 zeigen sehr ähnliche Werte. Die mittleren Gesteinswiderstände der Sandsteinhorizonte der Bohrung Ktzi202 ($z = 627 - 636$ m (u GOK)) betragen für die Messungen mit geringerer Eindringtiefe rund $0,8 \Omega\text{m}$, während sie für die Messungen mit größerer Eindringtiefe rund $1,1 \Omega\text{m}$ betragen (Abb. 3.6). Die Widerstandsprofile in Ktzi201 und Ktzi200 zeigen sehr ähnliche Werte.

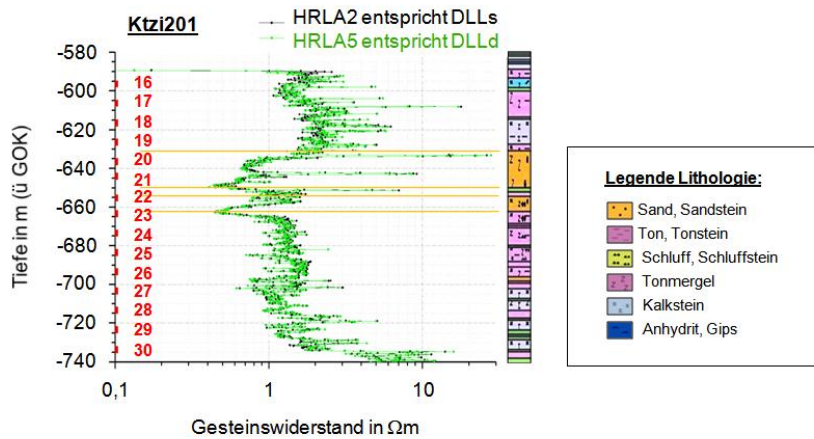


Abb. 3.5: Widerstandsprofile mit jeweils großer (HRLA5, grün) und geringer (HRLA2, schwarz) Eindringtiefe des High-Resolution Laterolog Array Tool (HRLA) in der Injektionsbohrung Ktzi201 für die Tiefenbereiche (TVD) des installierten VERA-Systems (Elektroden sind rot markiert und nummeriert) (Daten nach Schlumberger GmbH Oilfield Service, 2007) und die Lithologie (orange: Sandsteinreservoir der Injektionsbohrung (nach Norden, 2007b).

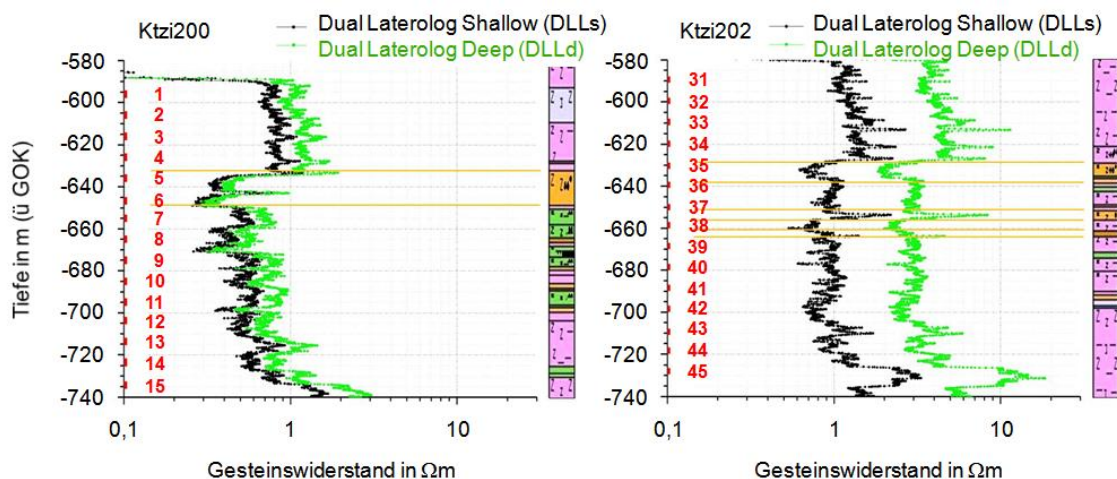


Abb. 3.6: Widerstandsprofile mit jeweils großer (DLLd; grün) und geringer (DLLs; schwarz) Eindringtiefe der Dual Laterologs in den Beobachtungsbohrungen Ktzi200 (links) und Ktzi202 (rechts) für die Tiefenbereiche (TVD) des installierten VERA-Systems (Elektroden sind rot markiert und nummeriert) (Daten nach BLM -Gesellschaft für Bohrlochmessungen mbH, 2007) und jeweils die Lithologie (orange: Sandsteinreservoir) der beiden Beobachtungsbohrungen (nach Norden, 2007a, c).

3.3.4 Aktives seismisches Monitoring

Seismische Messungen an der Oberfläche und im Bohrloch ermöglichen aufgrund einer gezielten Anregung elastischer Wellen die strukturelle und lithologische Erkundung des Untergrundes hinsichtlich lagerstättenkundlicher, bergbau- und ingenieurtechnischer Fragestellungen (Knödel *et al.*, 2005). Gasführende Schichten sind sowohl durch eine zunehmende Reflexionsamplitude, als auch durch eine Geschwindigkeitsverringerung der P-Wellen (Longitudinalwellen) gekennzeichnet. Somit ließ sich die CO₂-Ausbreitung im Reservoir am Pilotstandort Ketzin mit folgenden seismischen Verfahren überwachen (Eiken *et al.*, 2011; Lüth *et al.*, 2011; White, 2011):

- Seismische Bohrlochmessungen (engl.: *crosshole seismic*) in Ktzi200 und Ktzi202
- 2D- und 3D- vertikale seismische Profile (engl.: *vertical seismic profiling, VSP*)
- 2D-MSP (engl.: *moving source profiling, MSP*)
- 2D-Oberflächen-Messungen („Stern“)
- 3D-Oberflächen-Messungen.

Für die **seismischen Bohrlochmessungen** wurde mit einer seismische Quelle (piezoelektrischer Schwingungsgeber) in der Beobachtungsbohrung Ktzi200 (Tiefenbereich 452 - 739 m (u GOK), 1 m-Schritt) angeregt, während mit 12 seismischen Empfängern (Hydrophonen) in der Beobachtungsbohrung Ktzi202 (Tiefenbereich 450 - 740 m (u GOK), 1 m-Schritt) registriert wurde (Götz *et al.*, 2011; Lüth *et al.*, 2011; Götz, 2013). Ergebnisse der klassischen Laufzeittomographie der P-Wellen lieferten für die ersten beiden Wiederholungsmessungen (07/2008, 08/2008) im Vergleich zur Nullmessung (05/2008) keine eindeutig interpretierbaren Laufzeitanomalien, die die CO₂-Ausbreitung im Untergrund erfassen.

Bei den **2D-VSP- und MSP-Messungen** erzeugte eine seismische Quelle auf sieben sternförmig von den Bohrungen ausgehenden Messlinien (200 bis 1.500 m lang) an der Erdoberfläche mit Hilfe eines Vibrators vom Typ Vibsist (auf Fahrzeug montierter, elektrisch gesteuerter Abbruchhammer, der seine Schläge auf eine auf die Erdoberfläche gepresste Bodenplatte ausübt) seismische Wellen, die von einer Geophonekette (bestehend aus acht seismischen Empfängern, 10 m Abstand) in der Bohrung Ktzi202 aufgezeichnet wurden. Bei den VSP-Messungen blieb die seismische Quelle fest an einem Oberflächenpunkt. Befand sich die Quelle bohrlochnah, sprach man von Zero-Offset-VSP (hier: nahe Ktzi202), lag sie mit größerer Entfernung zur

Bohrung, sprach man von Offset-VSP (hier: jeweils am Mittel- und Endpunkt der Messlinien). Die Geophonkette wurde bei den Offset-VSP-Messungen in 5 m-Schritten (Tiefenbereich 325 - 720 m (u GOK)) bewegt. Bei den MSP-Messungen (auch walkaway-VSP) blieb die Geophonkette fest im Tiefenbereich (470 - 540 m (u GOK)), während die seismische Quelle in 12 m-Schritten auf den sieben Messlinien um die Bohrungen bewegt wurde. Die VSP- und MSP-Messungen lieferten hochauflösende Informationen im Nahbereich (200 m Umkreis) der Beobachtungsbohrung Ktzi202 (Yang *et al.*, 2010; Götz *et al.*, 2011; Lüth *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2011, Götz, 2013). Der entscheidende Unterschied zwischen den VSP- und MSP-Messungen lag in der Anzahl der Empfänger und Quellpunkte: bei den VSP-Messungen gab es viele Empfänger in der Bohrung, aber nur wenige Quellpunkte an der Erdoberfläche, während bei den MSP-Messungen nur wenige Empfänger in der Bohrung und viele Quellpunkte an der Erdoberfläche existierten. Die erste VSP-Wiederholungsmessung (02/2011) zeigte deutliche Änderungen in der Reflexionsamplitude und der P-Wellengeschwindigkeit (Götz, 2013) im Vergleich zur Nullmessung (11/2007).

Bei den seismischen **2D-Oberflächenmessungen** (pseudo-3D-„Stern“-Messungen) wurde die seismische Quelle (Vibrist-Vibrator) im Abstand von 12 m auf den sieben sternförmig von den Bohrungen ausgehenden Messlinien bewegt, während die Geophone im Abstand von 24 m auf allen der sieben Messlinien gleichzeitig das Messsignal registrierten (Giese *et al.*, 2009; Bergmann *et al.*, 2011; Ivandic *et al.*, 2012). Die antiklinale Struktur des Deckgebirges wurde mithilfe der reflexions-seismischen Messungen untersucht, um die Dichtheit des Speicheraquifers zu überwachen (Ivandic *et al.*, 2012). Während die erste Wiederholungsmessung (09/2009) im Vergleich zur Nullmessung (11/2005) noch keine wesentlichen Amplitudenänderungen zeigte (Bergmann *et al.*, 2011), konnte die zweite Wiederholungsmessung (02/2011) mit deutlicheren Amplitudenänderungen eine Vorzugsrichtung der CO₂-Ausbreitung nach Westen nachweisen.

Neben dem Verlauf der Sandsteinrinnen in NW-SE Richtung im Nahen Umfeld der drei Bohrungen, lieferten die Ergebnisse der Nullmessung (10/2005) der seismischen **3D-Oberflächenmessungen** Informationen über die Ausdehnung des Restgases des früheren Speicherhorizontes des Altspeichers in einer Tiefe von 250 m bis 400 m. Im Bereich aller drei Bohrungen konnte kein Restgas nachgewiesen werden. Es sollte somit weder ein Risiko beim Abteufen, noch bei der Komplettierung der Bohrungen darstellen (Juhlin *et al.*, 2007; Giese *et al.*, 2009), das durch den praktischen Bohrbetrieb bestätigt wurde. Seismische Modellierungen beweisen die Detektierbarkeit von sehr gering mächtigen gasführenden Schichten (Bergmann *et al.*, 2010).

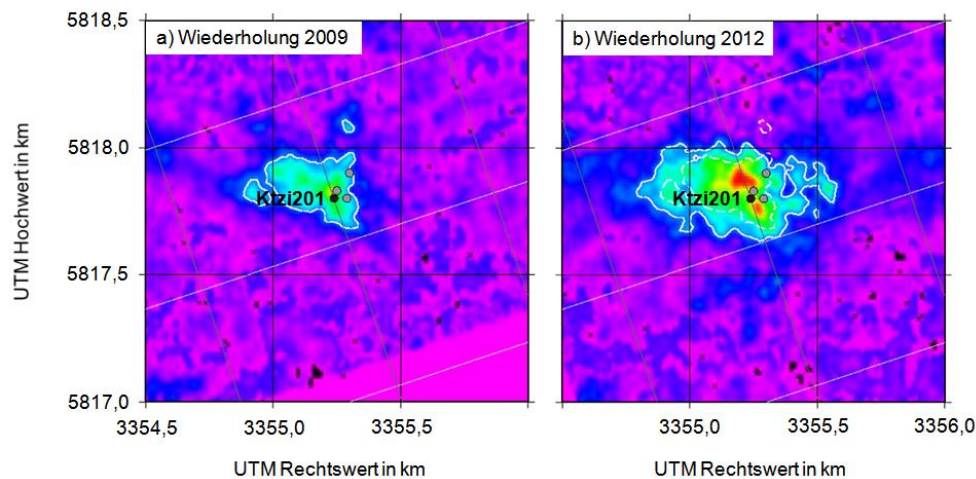


Abb. 3.7: Darstellung der normierten Differenzen der Reflexionsamplituden (Nullmessung - Wiederholung) für die erste (a) und die zweite (b) Wiederholung der 3D-Oberflächen-Seismik im Tiefenbereich des Reservoirs. Die Lage der Injektionsbohrung Ktzi201 ist mit einem schwarzen Punkt gekennzeichnet. Die weiße durchgezogene Linie kennzeichnet den CO₂-Ausbreitungsfortschritt zum Zeitpunkt der jeweiligen Wiederholungsmessung (nach Ivandic *et al.*, 2015).

Lüth *et al.* (2015) schätzten die Auflösung der Schichtmächtigkeiten auf mindestens 5 m ab. Während seismische 3D-Oberflächenmessungen (seismische Energie-anregung mit einem beschleunigten EWG III-Fallgewicht, 250 kg) vor dem Injektionsbeginn Informationen über die Geometrie und den strukturellen Aufbau der Antiklinale bis zu einer Tiefe von 1.000 m lieferten (Juhlin *et al.*, 2007), konnten mit den beiden Wiederholungsmessungen (10/2009, 2012) Aussagen über den Verlauf und die räumliche Ausdehnung des injizierten CO₂ im Speichergestein gewonnen werden (Ivanova *et al.*, 2012; 2013; Ivandic *et al.*, 2015). Abbildung 3.7 zeigt farbcodiert jeweils die normierten Differenzen der Reflexionsamplituden für die erste (a) und die zweite (b) Wiederholung (nach Ivandic *et al.*, 2015) im Tiefenbereich des Reservoirs.

3.3.5 Temperaturmonitoring

Der Bohrvorgang selbst, die im Bohrloch zirkulierende Spülung sowie ihr Eindringen in die Formation stören das natürliche Wärmefeld des Gebirges und damit auch seine Temperaturverteilung. Nach dem Angleichen der Spülungstemperatur an die Gebirgstemperatur sind Temperaturmessungen im Bohrloch zur Untersuchung des natürlichen Wärmefeldes der Erdkruste möglich. Dieser Gleichgewichtszustand ist nur dann mit dem ursprünglichen Temperaturzustand identisch, wenn beispielsweise keine weiteren hydraulischen Ausgleichsströmungen zwischen wasserführenden Formationen oder unterschiedlichen hydraulischen Potentialen stattfinden (Hatzsch, 1994).

Am Pilotstandort Ketzin wurde je ein faseroptisches Temperatursensorkabel (engl.: *Distributed Temperature Sensing, DTS*) in den Bohrungen Ktzi200, Ktzi201 und Ktzi202 permanent im Ringraum eingebaut (Henninges *et al.*, 2008; Giese *et al.*, 2009). Der eigentliche Temperatursensor besteht aus einem wärmeempfindlichen Lichtwellenleiterkabel. Temperaturprofile können zeitlich kontinuierlich entlang des Temperatursensorkabels über den gesamten Tiefenbereich der Bohrung mit einer hohen Orts- (bis zu 0,25 m) und Temperaturlösung (0,3 °C) erfasst werden, ohne das Temperaturfeld im Bohrloch (durch Sondenbewegung) zu stören (Henninges *et al.*, 2008).

Des Weiteren ermöglichten DTS-Messungen eine Echtzeitüberwachung des Zementationsverlaufes und dessen Qualitätsbeurteilung. Da beim Aushärten (Abbinden) des Zementes Hydratationswärme freigesetzt wird, eignen sie sich zur Lokalisierung des oberen Abschlusses des Zementes (Zementkopf). In Ketzin lieferten die DTS-Messungen Informationen über die Tiefenlage der zementierten Bohrlochbereiche während des Zement-Abbindens (Henninges & Brandt, 2007; Henninges *et al.*, 2008). Diese Informationen konnten mit in der Industrie gängigen Zementlogs zu einem späteren Zeitpunkt bestätigt werden (Prevedel *et al.*, 2008). Die Temperaturkurven der Bohrung Ktzi200 sind in Abbildung 3.8 nach Henninges & Brandt (2007) farbcodiert für den Zeitraum der Stingerzementation (unterer Bohrlochbereich) dargestellt. Die Temperaturkurven für den Zeitraum der Stopfenzementation (oberer Bohrlochbereich) sind in Abbildung 3.9 nach Henninges *et al.* (2008) für alle drei Bohrungen zusammengefasst. In der Bohrung Ktzi200 ist die Fehlzementation oberhalb der Filterrohre erkennbar.

Um Transportprozesse im Untergrund zu überwachen, ist die Temperatur ebenfalls ein geeigneter Messparameter. Temperaturänderungen können dabei u.a. aus Temperaturunterschieden zwischen dem injizierten CO₂ und dem Speichergestein, aber auch aus Volumenänderungen aufgrund von Druckänderungen oder aus Lösungsvorgängen und Phasenübergängen resultieren. In den beiden Beobachtungsbohrungen Ktzi200 und Ktzi202 konnten Temperaturanomalien nach der CO₂-Ankunft beobachtet werden (Giese *et al.*, 2009). Die Interpretation der Temperaturanomalien ist aufgrund der auftretenden Phasenübergänge an den Beobachtungsbohrungen und der operativen Historie vor dem Injektionsbeginn nicht trivial (Würdemann *et al.*, 2010; Henninges *et al.*, 2011).

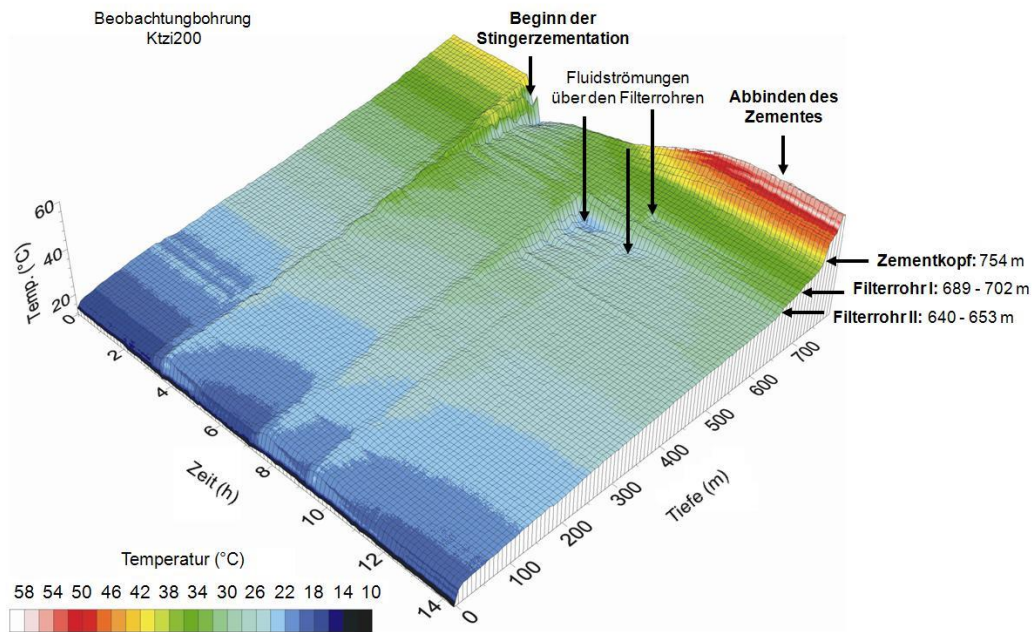


Abb. 3.8: Farbcodierte Temperaturkurven (über der Tiefe und der Zeit dargestellt) der Beobachtungsbohrung Ktzi200 aus ortsverteilten Temperaturmessungen für den Zeitraum der Stingerzementation im unteren Bohrlochbereich (nach Henniges & Brandt, 2007). Die DTS-Messungen ergaben einen Zementkopf bei 754 m (statt wie geplant bei 710 m (u GOK)).

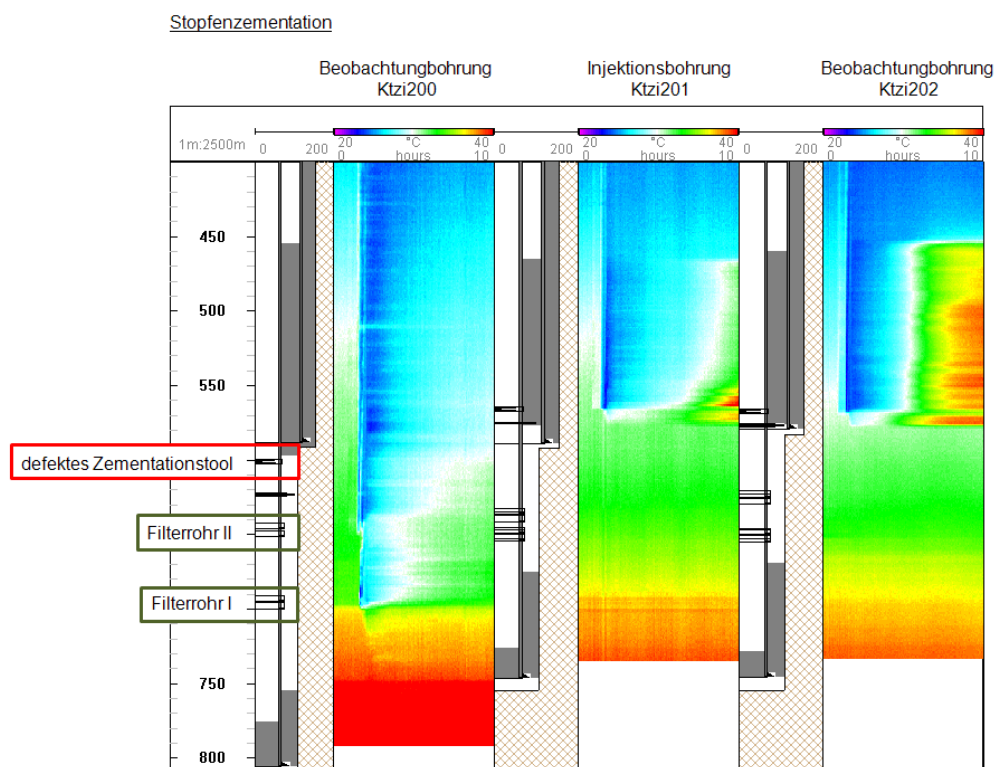


Abb. 3.9: Temperaturkurven der Injektionsbohrung Ktzi201 (mitte) und der beiden Beobachtungsbohrungen Ktzi200 (links) und Ktzi202 (rechts) aus ortsverteilten Temperaturmessungen für den Zeitraum der Stopfzementation im oberen Bereich der Bohrungen (nach Henniges *et al.*, 2008).

3.3.6 Geochemisches Monitoring

Direkte geochemische Untersuchungen in der Bohrung sind neben indirekten geophysikalischen Messungen zur Beobachtung des CO₂-Injektionsprozesses besonders wichtig. Die Geochemie ist die einzige direkte Methode zur Messung des injizierten CO₂ und seiner Ausbreitung. Kontinuierliche in-situ Gasmessungen mit Untertagesensoren erhöhen die zeitliche und räumliche Analysedichte im Gegensatz zu traditionellen chemischen Methoden, bei denen einzelne Proben genommen und später im Labor untersucht werden.

Der am Pilotstandort Ketzin in den beiden Beobachtungsbohrungen Ktzi200 und Ktzi202 eingesetzte Gasmembransensor (engl.: *Gas Membrane Sensor, GMS*) wurde von Zimmer und Erzinger (2009) entwickelt und patentiert. Der GMS ist ein Messsystem zur kontinuierlichen Detektion und Analyse von CO₂ und anderen Gasen im Untergrund und in tiefen Bohrungen (Zimmer *et al.*, 2011b).

Der Sensor besteht aus einem phasenseparierenden Membran-Gassammelelement (1 m Länge) im Bohrloch, einem Gasanalysegerät an der Erdoberfläche und einem speziellen Bohrlochmesskabel. Das perforierte Membranelement wird bis in die Zielteufe der Beobachtungsbohrung eingefahren. Das in der Bohrspülung und dem Formationswasser gelöste Gas diffundiert aus der Flüssigkeit durch die Membranwand und wird vom Trägergas Argon aufgenommen. Das Trägergas wird aus einer Druckgasflasche an der Erdoberfläche über eine Edelstahlkapillare im Messkabel in das Membranelement transportiert. Über eine zweite Kapillare gelangt das Trägergas samt dem zu untersuchenden Gas zurück an die Erdoberfläche. Dort wird das Gas aus der Bohrung in einem Massenspektrometer in Echtzeit analysiert (Zimmer & Erzinger, 2009; Zimmer *et al.*, 2011b). Zu Beginn wurde der GMS zur kontinuierlichen Bestimmung der Gaszusammensetzung in die Bohrungen Ktzi200 in einer Tiefe von 640 m (u GOK) und in Ktzi202 in einer Tiefe von 623 m (u GOK) jeweils im Bereich der unteren Filterrohre installiert. Aufgrund technischer Probleme mit dem Messkabel musste der GMS nach zwei Wochen Betrieb in der Bohrung Ktzi200 und nach acht Monaten in Ktzi202 jeweils auf eine Tiefe von 150 m (u GOK) versetzt werden (Zimmer *et al.*, 2011b).

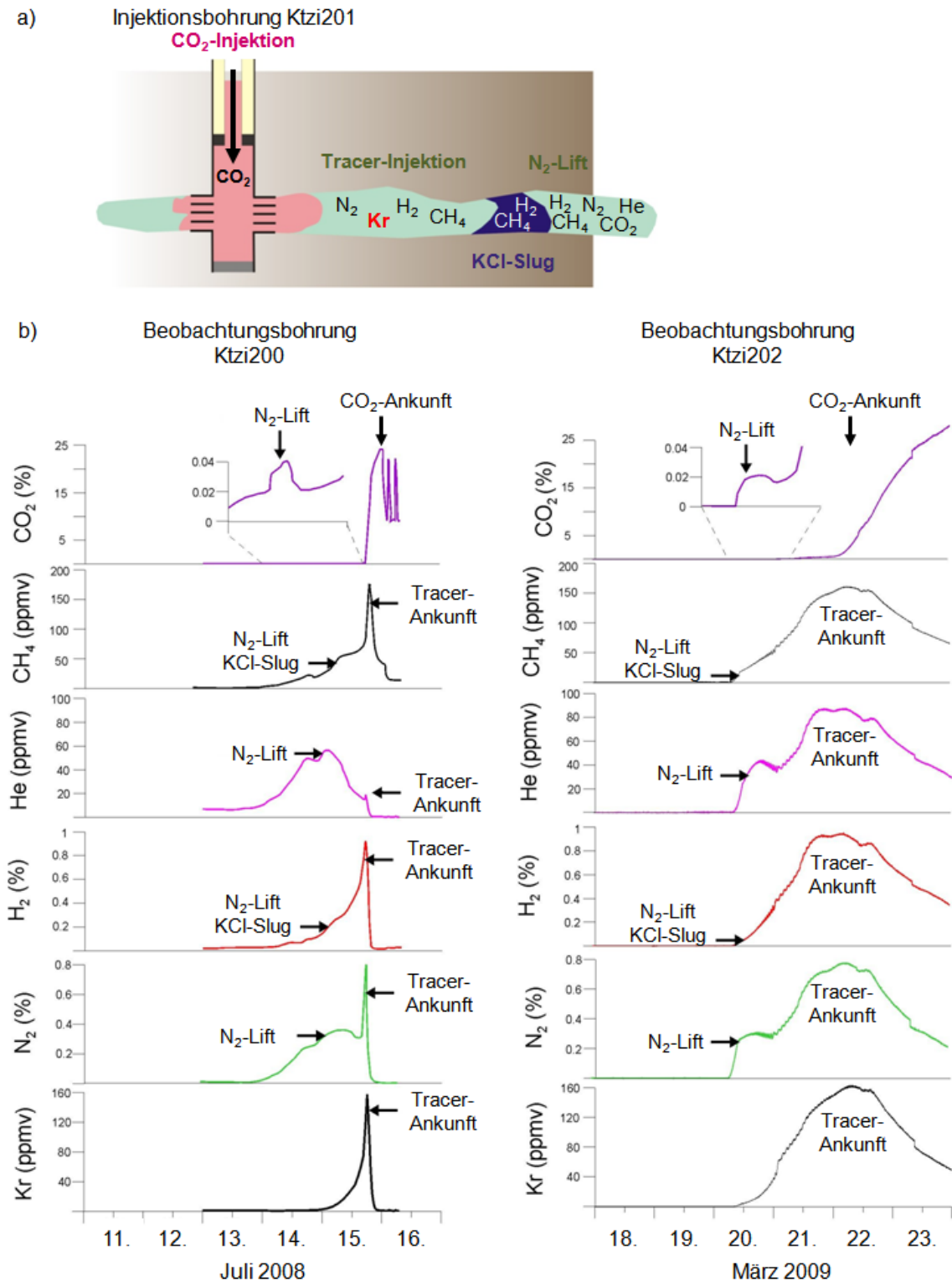


Abb. 3.10: a) Prinzipskizze der einzelnen Injektions-Phasen in der Injektionsbohrung Ktzi201: N₂-Lift, KCl-Slug, Tracer-Injektion, CO₂-Injektion mit den einzelnen Gaskomponenten (nach Zimmer *et al.*, 2011b). b) Die mit dem GMS gemessenen Gaskonzentrationen in Abhängigkeit von der Zeit kennzeichnen beispielsweise die Ankunft des Krypton-Tracers (Kr) und die CO₂-Ankunft an der Beobachtungsbohrung Ktzi200 (07/2008; 50 m von der Injektionsbohrung Ktzi201 entfernt; links) und an der Beobachtungsbohrung Ktzi202 (03/2009; 112 m von Ktzi201 entfernt; rechts) (nach Zimmer *et al.*, 2011b).

Unmittelbar vor dem Beginn der CO₂-Injektion wurde die verminderte Injektivität in der Injektionsbohrung Ktzi201 durch ein Lufthebeverfahren (Stickstoff-Lift) behoben. Die biologische Umsetzung der Bohrspülung und die damit verbundene Eisensulfid-Bildung verursachten diese Injektivitätsminderung und hätten die CO₂-Injektion unmöglich gemacht (Hoth & Würdemann, 2009; Zettlitzer *et al.*, 2010). Im Anschluss an den Stickstoff-Lift wurde ein sogenannter KCl-Slug durchgeführt, bei dem eine 6 %ige Kaliumchlorid-Lösung zur Präventionsmaßnahme injiziert wurde, um eine mögliche CO₂-induzierte Salzausfällung durch Trocknungseffekte zu vermeiden (Würdemann *et al.*, 2009). Danach wurde das Markierungsgas (engl.: *tracer*) Krypton (Kr) zusammen mit Stickstoff (N₂) injiziert. Die einzelnen Phasen vor der CO₂-Injektion sind in Abbildung 3.10a schematisch dargestellt.

Mithilfe der gemessenen Gaskonzentrationen konnten beispielsweise die Ankunft des vorgespannten Stickstoffes, des Krypton-Tracers und des injizierten CO₂ an beiden Beobachtungsbohrungen Ktzi200 und Ktzi202 nach einer Injektionsmenge von 531 t CO₂ (15.07.08) und von 11.000 t CO₂ (22.03.09) nachgewiesen werden (Schilling *et al.*, 2009; Würdemann *et al.*, 2010; Zimmer *et al.*, 2011b). Sie sind in Abbildung 3.10b zusammengefasst.

Neben geochemischen Untersuchungen in der Bohrung wurden auch Langzeit-Messungen an der Oberfläche durchgeführt. Um mögliche Oberflächen-CO₂-Leckagen von natürlichen Schwankungen zu unterscheiden, wurde der CO₂-Fluss vor dem Injektionsbeginn (2005 - 2007) auf einem Gebiet von 3 x 3 km um die Bohrungen an 20 Messstationen monatlich gemessen (Zimmer *et al.*, 2011a). Während der gesamten CO₂-Injektion konnten keine erhöhten Werte gemessen werden.

3.3.7 Weitere Monitoringmethoden

Es wurden zahlreiche weitere Überwachungsmethoden am Pilotstandort Ketzin angewandt. Einige weitere werden in diesem Kapitel kurz erläutert.

Druck- und Temperaturmessungen am Bohrlochkopf und in der Injektionstiefe (Henninges *et al.*, 2011; Möller *et al.*, 2012; Liebscher *et al.*, 2013) ermöglichten einen sicheren Injektionsbetrieb und beschrieben das Reservoir während des CO₂-Injektionsprozesses (Giese *et al.*, 2009). Kontinuierlich wurde auch die **CO₂-Durchflussmenge** (Möller *et al.*, 2012) bestimmt, um u.a. die injizierte CO₂-Rate genau kontrollieren zu können.

Mikrobiologische Prozesse spielten bei der Beeinflussung der Reservoir- und Caprock-Stabilität eine wichtige Rolle und wurden durch hydrochemische und biologische Beprobung genauer analysiert. Beispielsweise konnten Organismen, die die Injektivität der Injektionsbohrung herabsetzen, bestimmt werden und wirksame Gegenmaßnahmen eingeleitet werden (Giese *et al.*, 2009; Zettlitzer *et al.*, 2010). Die Ergebnisse zum **Mikrobiologisches Monitoring** fassen Morozova *et al.* (2010, 2011) zusammen.

Passives seismisches Monitoring ermöglichte die Beurteilung der Dichtigkeit der Bohrungen und des Reservoirs und erlaubte somit eine Risikobewertung während der CO₂-Speicherung (Arts *et al.*, 2011; Xu *et al.*, 2012).

Ergänzend zu den geoelektrischen Oberflächen-Bohrlochmessungen (Kap. 5) lieferte das **aktive elektromagnetische Monitoring** (engl.: *controlled source electromagnetic, CSEM*) ebenfalls Informationen zur Verteilung des elektrischen Widerstandes im Untergrund und zu seiner Beeinflussung durch das injizierte CO₂ (Girard *et al.*, 2011; Streich *et al.*, 2011; Grayver *et al.*, 2014).

Das durchgeführte **Bohrlochlogging** umfasste neben den Widerstands-Bohrlochmessungen (Kap. 3.3.3) beispielsweise CO₂-Sättigungsbestimmungen mit dem Puls-Neutron-Gamma-Verfahren (engl.: *pulsed neutron gamma, PNG*; Baumann *et al.*, 2013, 2014) und Zementationsbohrlochmessungen (engl.: *cement bond log, CBL*; Prevedel *et al.*, 2008). Neben Bohrlochabweichungsmessungen, die in Kapitel 4.1.2 beschrieben werden, wurden auch Kalibermessungen (engl.: *caliper log, CAL*) durchgeführt. Um eine optische Kontrolle des Bohrungszustandes zu ermöglichen, fanden regelmäßig Bohrlochbefahrungen mit Videokameras statt (Liebscher *et al.*, 2012).

Weiterhin wurde eine Reihe von Modelluntersuchungen durchgeführt, die hier erwähnt, aber nicht diskutiert werden. Es wurden numerische Modelle entwickelt und Risikoabschätzungsstrategien erarbeitet (Schilling *et al.*, 2008; Liebscher *et al.*, 2012). Es wurden zahlreiche numerische Simulationen zur geologischen CO₂-Speicherung (u.a. Ebigbo *et al.*, 2006; Kopp *et al.*, 2009; Kempka *et al.*, 2010; Nimtz *et al.*, 2010; Kempka & Kühn, 2013), zur oberflächennahen Grundwasserströmung (Norden, 2011) und zur geophysikalischen Abbildung der CO₂-Ausbreitung (u.a. Lengler *et al.*, 2010; Bergmann *et al.*, 2010; Streich *et al.*, 2010; Lengler, 2012) durchgeführt. Norden & Frykman (2013) entwickelten ein geologisches Reservoirmodell für dynamische Modellierungen während der Planungsphase sowie der ersten Injektionsetappen.

4. Geoelektrische Messungen im Bohrloch zur Überwachung der CO₂-Ausbreitung

Ziele der geoelektrischen Messungen im Bohrloch waren neben der Beobachtung und der Abbildung des CO₂-Injektionsfortschrittes die Begleitung und Überwachung der erfolgreichen Installation der Elektroden im Bohrloch. Wesentliche Fragestellungen waren dabei:

- Ökonomische Aspekte der Realisierung,
- technische Herausforderungen und Lösungsstrategien in der Installationsphase,
- Anpassung der geoelektrischen Messungen an die Standortbedingungen im Bohrloch und im näheren Bohrplatzumfeld,
- Bewertung der Anwendbarkeit der geoelektrischen Verfahren im Bohrloch und kombiniert an der Erdoberfläche und im Bohrloch, sowie
- das Aufzeigen der Grenzen dieser Verfahren.

Die geoelektrischen Messungen werden insbesondere im Vergleich und als Ergänzung der weiteren angewandten Monitoringmethoden (Kap. 3.3) betrachtet. Sie sollen die Migration direkt am Injektionspunkt näher beschreiben und ergänzende Informationen über die elektrische Widerstandsverteilung im Reservoir liefern.

In diesem Kapitel werden die geoelektrischen Messungen im Bohrloch vorgestellt, sowie ihre Ergebnisse beschrieben und diskutiert. Zur Datenaufnahme wurden ausschließlich die permanent im Bohrloch installierten Elektroden verwendet. Zur Vervollständigung des umfangreichen Monitoringkonzeptes wurden die Ergebnisse der geoelektrischen Messungen in diesem Kapitel mit den Laboruntersuchungen und weiteren Monitoring-Ergebnissen verknüpft und bewertet. Die geoelektrischen Messungen kombiniert an der Erdoberfläche und in den Bohrungen werden im Kapitel 5 gesondert betrachtet.

Zur angemessenen Einordnung der geoelektrischen Messungen und der Diskussion der Ergebnisse in den zeitlichen Projektverlauf, wird zuerst der technische Aufbau des Vertikalelektrodensystems im Bohrloch erläutert (Kap. 4.1). Dazu wurde eine neuartige Verrohrungstechnologie angewandt.

Elektrische Ankopplungsmessungen wurden genutzt, um die Installation der Elektroden in die Bohrungen Ktzi200, Ktzi201 und Ktzi202 und ihre Zementation zu begleiten und zu überwachen (Phase I, Kap. 4.2). Danach werden CO₂-Vorinjektionsmaßnahmen, der Injektionsverlauf und die technische Umsetzung der CO₂-Injektion umfassend beschrieben und erklärt (Kap. 4.3). Vor dem eigentlichen Start der CO₂-Injektion

(Phase II, Kap. 4.4) wurden geoelektrische Messungen in einer und in mehreren Bohrungen sowie elektrische Ankopplungsmessungen durchgeführt. Es wurden eine CO₂-Testinjektion, generelle Vorinjektionsmaßnahmen und die CO₂-Injektion mit geringer Rate überwacht und bewertet. Während des eigentlichen CO₂-Injektionsprozesses mit erhöhter CO₂-Injektionsrate (Phase III, Kap. 4.5) wurden die Messungen aus Phase II wiederholt und so der CO₂-Ausbreitungsprozess analysiert und charakterisiert.

Die drei Phasen lassen sich wie folgt gliedern:

- **Phase I:** Geoelektrische Messungen während der Installation und Zementation der Bohrlochelektroden
- **Phase II:** Geoelektrische Messungen im Bohrloch vor dem eigentlichen Start der CO₂-Injektion
- **Phase III:** Geoelektrische Überwachung der CO₂-Injektion.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der CO₂-Injektionsprozess von 06/2008 bis 05/2009 geoelektrisch überwacht. Die Abbildung der CO₂-Ausbreitung bis zum Ende der CO₂-Injektion 2013 sowie darüber hinaus war nicht Gegenstand dieser Arbeit. Die Ergebnisse dieser geoelektrischen Messungen sind u.a. in Schmidt-Hattenberger *et al.* (2011; 2012; 2013; 2014); Martens *et al.* (2012; 2015a; 2015b) zusammengefasst.

Desweiteren wurde die Gesamteffizienz der Messanordnung bewertet (Kap. 4.6). Es wurde die Wahl der Anordnung der Bohrungen Ktzi200, Ktzi201 und Ktzi202 zueinander eingeschätzt, indem die Ziele der geoelektrischen Überwachungsmessungen berücksichtigt wurden. Der Einfluss der Bohrlochabweichung auf die Elektrodenpositionen und somit auf den Geometriefaktor wurde beurteilt und die Elektrodenpositionierung während des Einbaus berücksichtigt. Abschließend wurde der langfristige Elektrodenausfall einzelner Bohrlochelektroden betrachtet und analysiert (Kap. 4.7).

4.1 Technischer Aufbau des permanenten Vertikalelektrodensystems

In diesem Kapitel wird der technische Aufbau des permanent installierten Vertikalelektrodensystems vorgestellt. Dafür wurde eine neuartige Verrohrungstechnologie angewandt. Sie wurde im Hinblick auf die vorliegende Aufgabe, die Überwachung und Charakterisierung der CO₂-Injektion und CO₂-Ausbreitung im geologischen, tiefen Untergrund, entwickelt. Es wird auf die erwarteten Vorteile dieses

neuen Verrohrungsaufbaus eingegangen sowie die Komplettierung der Bohrungen erläutert.

Technischer Aufbau des Vertikalelektrodensystems

Die permanent installierten Bohrlochmonitoringsysteme umfassen für alle drei Bohrungen jeweils 15 Vertikalelektroden und je ein faseroptisches Temperatursensorkabel (Kap. 3.3.5) zur ortsverteilten Temperaturmessung. In die Bohrungen Ktzi201 und Ktzi202 wurde zusätzlich je ein Heizkabel erfolgreich eingebaut, sowie in die Bohrung Ktzi201 ein faseroptischer Druck-Temperatur-Sensor (Kap. 3.3.7; Giese *et al.*, 2009).

Die erstmalige Anwendung eines permanenten, zementierten Elektrodensystems im Bohrloch beschrieben Bryant *et al.* (2001; 2002). Die Bohrlochelektroden wurden zur geoelektrischen Überwachung einer Frischwasserinjektion und dessen Ausbreitung im Erdölfeld zwischen zwei Bohrungen (Injektion- und Beobachtungsbohrung) genutzt. Ihr Messsystem bestand jeweils aus einem (entlang der isolierten Verrohrung) einzementierten Messkabel mit 16 integrierten Elektroden in rund 308 m bis 325 m Tiefe. Der prinzipielle Aufbau und die Zielsetzung der Messungen in diesem Literaturbeispiel (Kap. 2.3.3) sind mit dem Versuchsaufbau und den Nutzungszielen am CO₂-Speicherstandort Ketzin vergleichbar. In Ketzin befinden sich die Elektroden allerdings in einer größeren Installationstiefe (590 m bis 735 m (u GOK)). Statt der im Messkabel integrierten Elektroden wurden Ring-Elektroden genutzt, die auf der isolierten Verrohrung angeklemt wurden.

Um am Standort Ketzin die Bohrlochelektroden richtungsunabhängiger zu nutzen, wurden sogenannte Ring-Elektroden verwendet. Sie wurden permanent auf der isolierten Verrohrung angebracht. Somit fließt der eingespeiste elektrische Strom während einer Messung in alle Richtungen um die Bohrung gleichmäßig in den Untergrund. Bei Messungen mit einem Messkabel mit integrierten Elektroden stellt die isolierte benachbarte Verrohrung einen Störkörper dar, der den Stromfluss behindert. Zusätzlich bieten die Ring-Elektroden durch ihre größere Elektrodenoberfläche eine größere Kontaktfläche zum Untergrund. Diese senkt damit den Übergangswiderstand (Friedel, 2000) und verbessert die Signalstärke. Aufgrund der Verwendung von einzelnen Ring-Elektroden auf der isolierten Verrohrung müssen die Elektroden ans Messkabel angeschlossen werden.

Am CO₂-Speicherstandort Ketzin besteht das permanent installierte Vertikalelektrodensystem (VERA) aus 45 zylindrisch geformten Edelstahlelektroden (Ring-Elektroden). In jeder der drei Bohrungen sind 15 Elektroden installiert. Sie wurden

jeweils an ein 15-adriges Bohrlochmesskabel angeschlossen. Da der Kabelmantel dem injizierten CO₂, sowie dem Formationswasser und der Bohrlochspülung dauerhaft standhalten musste, gab es für jede Elektrode eine druck- und wasserdichte Kabelausführung sowie einen druck- und wasserdichten Verbindungsstecker, mit dem jede Elektrode am Messkabel befestigt wurde. Die Kabelausführungen und Verbindungsstecker waren während der gesamten Messungen intakt. Die Messkabel wurden oberirdisch zu einem Feldarbeitsplatz (Labormesscontainer) verlegt, in dem die Messgeräte angeschlossen wurden. Die Messgeräte waren so vor Umwelteinflüssen geschützt sowie für Wartungsarbeiten und Fehlerbehebungen zugänglich. Die Bohrlochelektroden sind auf der isolierten Verrohrung (engl.: *insulated casing*) in Tiefenbereichen von etwa 590 m bis 735 m (u GOK) mit einem Elektrodenabstand von etwa 10 m installiert (Kießling *et al.*, 2010b).

Nach Rücker & Günther (2011) können die Bohrlochelektroden in Ketzin mit einer Höhe von 3,5“ (rund 10 cm) und einem Durchmesser von 5,5“ (rund 15 cm) aufgrund ihrer Abstände von 10 m innerhalb einer Bohrung als ideale Punktquelle bei geoelektrischen Messungen behandelt werden. Ihre Form und ihre Größe sind für die Inversion geoelektrischer Daten unerheblich. Im Weiteren wird der Begriff Punktelektrode verwendet.

Modellierungen und Planung zur Umsetzung von VERA

VERA wurde unter Berücksichtigung der elektrischen Eigenschaften im Speicheraquifer anhand von numerischen Vorwärtsmodellierungen entworfen (u.a. nach Christensen *et al.*, 2006; Ramirez *et al.*, 2003). Christensen *et al.* (2006) empfehlen auf Grundlage ihrer Modellierungen eine Länge der Elektrodenauslage in der Bohrung von mindestens der Größe des Abstandes der Bohrungen zueinander. Die Elektroden am Standort Ketzin sind jeweils über eine Länge von rund 140 m im Bohrloch installiert, während der Abstand der Bohrungen zueinander 50, 100 und 112 m beträgt (siehe Kap. 3.2). Die vorgegebene Empfehlung ist somit erfüllt. Aufgrund der geeigneten Tiefenpositionierung der Elektroden innerhalb der drei Bohrungen und ihrem Abstand zueinander konnte mit einer minimalen Anzahl von Vertikalelektroden und damit mit möglichst geringen Kosten eine ausreichende Genauigkeit der räumliche Auflösung zur Überwachung und Abbildung der CO₂-Ausbreitung im Reservoir erreicht werden. Es konnten alle für die CO₂-Injektion wesentlichen geologischen Horizonte mittels geoelektrischer Verfahren überwacht werden.

Ramirez *et al.* (2003) untersuchten in ihren numerischen Modellierungen unterschiedliche Elektrodenaufstellungen in Vertikal- und Horizontalbohrungen zur geoelektrischen Überwachung der CO₂-Injektion und CO₂-Speicherung im tiefen geologischen Untergrund. Es wurden Anordnungen mit Punktelektroden sowie Anordnungen, bei denen die Stahlverrohrung jeweils als Stabelektrode genutzt wurde, untersucht. Prinzipiell ist eine CO₂-Abbildung mit Anordnungen aus Punkt- als auch mit Stabelektroden in Vertikal- sowie Horizontalbohrungen möglich. Modellierungen mit Vertikalbohrungen als Stabelektroden lieferten Informationen wie beispielsweise Form, Lage und laterale Ausdehnung der CO₂-Fahne. Modellierungen mit Punktelektrodenanordnungen in Vertikalbohrungen sowie die Nutzung von Horizontalbohrungen liefern zusätzlich Informationen über die vertikale Ausdehnung der CO₂-Fahne und erlauben eine grobe Abschätzung des injizierten CO₂-Volumens im Untergrund.

In produzierenden Erdölfeldern ist meist eine Vielzahl von Förderbohrungen im Einsatz, die als Stabelektroden genutzt werden können. Somit bietet sich ein geoelektrisches Monitoring unter Nutzung der zahlreich vorhandenen Stabelektroden als eine kostengünstige Möglichkeit der Überwachung einer kommerziell genutzten CO₂-Speicherung an. Die Verwendung der Verrohrung als Stabelektrode bietet viele Vorteile gegenüber der Verwendung von einzelnen Punktelektroden auf der Verrohrung. Für eine Nutzung als Stabelektrode wird keine kostenintensive Außenbeschichtung auf den Edelstahlrohren, und somit keine Überwachung des Einbaus ins Bohrloch, benötigt. Stabelektroden sind dadurch kostengünstiger und mit weniger zeitlichen und technischen Aufwand nutzbar als Punktelektroden. Allerdings erzielen Punktelektrodenanordnungen eine deutlich bessere Auflösung. Bei einem wissenschaftlichen CO₂-Speichereperiment wie in Ketzin diente jede zur Injektionsbohrung zusätzlich niedergebrachte Bohrung ausschließlich dem Zweck des Monitorings und war mit hohen Bohrkosten verbunden. Somit war es sinnvoller, ein Array aus einzelnen Punktelektroden zur CO₂-Speicherüberwachung in den Beobachtungsbohrungen zu nutzen. Die geologischen Verhältnisse vor Ort, die Kabeldicke und die Bohr- und Installationskosten bestimmten letztendlich die Anzahl der Elektroden im Bohrloch und damit das räumliche Auflösungsvermögen.

Mithilfe der aus den Bohrkernen gewonnenen geologischen Erkenntnissen und der durchgeführten Gesteinsansprache (Kap. 3.3.1) wurde die Lage der Bohrlochelektroden in der Bohrung an die angetroffenen geologischen Verhältnisse angepasst. Vier Elektroden befanden sich somit jeweils in den geologischen Deckschichten (oberhalb der Speicherformation), sieben in der Speicherformation selbst und weitere vier

Elektroden im Bereich unterhalb der Speicherformation. Aufgrund einer Aufwölbung des salinen Aquifers in Richtung Norden, befanden sich die Elektroden in der nördlich liegenden Bohrung Ktzi202 in geringeren Tiefen als die Elektroden der südlich liegenden Bohrungen Ktzi200 und Ktzi201. Somit konnte der Speicherhorizont optimal überwacht werden. Das permanent installierte VERA-System wurde im Rahmen der Forschungsprojekte am CO₂-Speicherstandort Ketzin vom Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum, zur CO₂-Detektion entwickelt und patentiert (Schütt *et al.*, 2008).

Verrohrungstechnologie

Am Standort Ketzin wurde ein neues Konzept für eine sogenannte „intelligente Verrohrungstechnologie“ (engl.: *smart casing technology*) angewandt (Borm & Förster, 2005). Das Konzept umfasste permanent installierte Bohrlochmonitoringsysteme, die hinter der Verrohrung (zwischen Gebirge und Verrohrung) in die Bohrungen eingebracht und (teilweise) zementiert wurden (Schilling *et al.*, 2008). Diese permanente Installation bot die Möglichkeit, zeitlich kontinuierliche Messungen vor, während und nach der gesamten CO₂-Injektion durchzuführen. Die Risiken einer Beschädigung der Messsensoren und letztendlich auch die Risiken eines Sensorausfalls, die aufgrund des wiederholten Ein- und Ausfahrens der Messsysteme ins Bohrloch bestanden, wurden dadurch gemindert.

Eine permanente Installation ermöglichte überhaupt erst das Einbringen der Messsensoren in die Injektionsbohrung selbst, da der Bohrlochringraum (teilweise) zementiert sein musste, um einen CO₂-Aufstieg vom Reservoir zur Erdoberfläche zu verhindern. Das geoelektrische Messkabel konnte technisch gesehen jeweils nur im Bohrlochringraum verlaufen, da es an die auf der isolierten Verrohrung installierten Elektroden angeschlossen war. Das Ein- und Ausfahren von seismischen Messsystemen war auch innerhalb der Verrohrung der Injektionsbohrung aus Platzgründen nicht möglich, da dort bereits der CO₂-Injektionsstrang eingelassen war. Das Einbringen von Messsensoren innerhalb der Verrohrung war somit nur in den beiden Beobachtungsbohrungen möglich, während die Bohrlochelektroden in allen drei Bohrungen auf der Verrohrung installiert werden konnten.

Durch die Installation der Ring-Elektroden auf der isolierten Verrohrung, ist eine Perforation im Bohrloch nicht möglich. Bei einer Perforation werden mit einer speziellen Vorrichtung Löcher in die Verrohrung geschossen, um so den Zufluss ins Reservoir zu ermöglichen. Eine Sprengung im Bohrloch hätte die entlang der Verrohrung eingebauten

Bohrlochmesskabel beschädigen können. Stattdessen wurden pro Bohrung jeweils zwei vorperforierte, isolierte Rohre (Filterrohre; engl.: *filter casings*), genutzt. Sie waren jeweils rund 13 m lang und bestanden aus zwei Filterstrecken (engl.: *filter screens*), die ringsherum über jeweils 4 m lange Schlitze verfügten, durch die sich das injizierte CO₂ vom Injektionsstrang (im Inneren der Verrohrung verlaufend) in alle Richtungen ins Reservoir ausbreiten konnte.

Die Bohrungen Ktzi200, Ktzi201 und Ktzi202 wurden alle nach dem gleichen Verrohrungsschema ausgebaut. Das bedeutet, dass die Edelstahl-Verrohrung (auch: *Futterrohre*; engl.: *casing*) im Reservoirbereich jeder Bohrung mit zwei vorperforierten, isolierten Filterrohren für die CO₂-Injektion ausgestattet wurde. Dies ermöglichte vor dem CO₂-Speicherbeginn immer noch eine Nutzungsänderung der Bohrungen als Injektions- bzw. Beobachtungsbohrung. Wie sich später zeigte, war das eine sinnvolle Präventionsmaßnahme. Mit geringem Zeitverlust und geringen Kosten konnten auch die zur Beobachtung geplanten Bohrungen als Ausweichbohrung für die Injektion genutzt werden. Andererseits brachte der gleiche technische Ausbau aller Bohrungen von vornherein den Nachteil mit sich, dass Elektroden nicht vollständig zementiert werden konnten. Das bedeutete, dass die geoelektrischen Messungen durch eine mangelnde Ankopplung der Elektroden ans umliegende Gestein schwieriger und ungenauer waren.

Die Tiefenlage der zwei Filterrohre war jeweils abhängig von der geologischen Umgebung (Lage der Sandsteinschichten im Speicherhorizont). Die Filterrohre wurden in den drei Bohrungen in Tiefenbereichen zwischen 620 m und 700 m (u GOK) eingebaut (Prevedel *et al.*, 2008; Möller *et al.*, 2012). Das bedeutete, dass sich in der Bohrung Ktzi200 die Elektrode 11 auf dem Filterrohr I und die Elektrode 6 auf dem Filterrohr II befand. In der Bohrung Ktzi201 befanden sich die Elektroden 20, 21 und 22 auf den beiden Filterrohren und in der Bohrung Ktzi202 die Elektroden 34, 35 und 37.

Da die Verrohrung aus Edelstahl bestand, musste der Tiefenbereich, in dem die Bohrlochelektroden installiert waren und darüber hinaus, elektrisch isoliert sein. Es handelte sich dabei um Tiefen von 525 m bis 745 m (u GOK). Dies wurde mit einer speziellen Zwei-Komponenten-Außenbeschichtung (Ryt-Wrap™) erreicht (Prevedel *et al.*, 2008). Bei einer nicht-elektrisch isolierten Edelstahl-Verrohrung würde die gesamte Bohrlochverrohrung zusammen mit den installierten Bohrlochelektroden jeweils als Stabelektrode fungieren. Aufgrund der isolierten Verrohrung wirkten die installierten Bohrlochelektroden (wie vorgesehen) als Punktelektroden.

Eine zeitliche Einordnung der Bohr- und Installationsdaten, sowie die Vertikaltiefen (TVD) der isolierten Verrohrung (auch: Casing) und der isolierten Filterrohre sind in Tabelle 4.1 für jede der drei Bohrungen zusammengefasst.

Zum Konzept dieser neuen Verrohrungstechnologie gehören auch die Verrohrungszentrierkörbe (engl.: *casing centralizer*, siehe Abb. 4.2, rechts oben). Sie werden für den sicheren Einbau der Messkabel, die an der Außenseite der Verrohrung geführt werden, genutzt. Die Centralizer werden ähnlich wie die Bohrlochelektroden auf der Verrohrung angeklemt. Sie dienen der Befestigung, der Führung und dem Schutz der eingebauten Bohrlochmesskabel. Auch ermöglichen sie eine genaue Zentrierung der Verrohrung im Bohrloch. Somit wird bei der Zementierung eine gleichmäßige Verteilung des Bohrlochzements erreicht. Das Bohrloch erhält somit die notwendige mechanische Festigkeit und Dichtheit (Schwarzmeier & Voigt, 1978; Schilling, 2012).

Tab. 4.1: Zeitliche Einordnung der Bohr- und Installationsarbeiten der drei Bohrungen sowie Zusammenstellung der Tiefenbereiche des isolierten Casing mit jeweils zwei vorperforierten Filterrohren (nach Rinke, 2007a, b, c).

	Beobachtungsbohrung Ktzi200	Injektionsbohrung Ktzi201	Beobachtungsbohrung Ktzi202
Bohrbeginn	13.03.2007	21.05.2007	18.07.2007
Erreichen der Endteufe	02.05.2007	01.07.2007	14.08.2007
Elektrodeneinbau	05.05.2007	05.07.2007	18.08.2007
Isoliertes Casing (u GOK)	573,57 m – 740,25 m	562,21 m – 745,74 m	527,46 m – 745,46 m
Filterrohr I (u GOK) mit	689,11 m – 701,83 m	643,36 m – 656,15 m	643,98 m – 656,56 m
Filterstrecken (u GOK)	690,70 m – 694,79 m	644,88 m – 649,07 m	645,68 m – 649,68 m
	695,84 m – 699,93 m	650,02 m – 654,21 m	650,71 m – 654,71 m
Filterrohr II (u GOK) mit	640,38 m – 653,14 m	630,68 m – 643,36 m	619,04 m – 631,24 m
Filterstrecken (u GOK)	641,96 m – 646,06 m	632,23 m – 636,42 m	620,77 m – 624,77 m
	647,13 m – 651,22 m	637,37 m – 642,56 m	625,81 m – 629,81 m

Fehlzementation und Nutzungsänderung

Bei der Zementation in Ktzi200 wurde aufgrund eines technischen Defektes eines Abdichtelements (Quellpacker) im Bohrlochringraum der Zement über die Filterstrecken eingepumpt. Henniges *et al.* (2008) bestätigen dies anhand von Temperaturmessungen während der Stopfzementation in dieser Bohrung (siehe Abb. 3.9, Kap. 3.3.5). Eine gute Abdichtung des Ringraumes oberhalb der Filterrohre konnte mittels eines Zementlogs (CBL) nachgewiesen werden (Würdemann *et al.*, 2010). Trotz dass Zement über die Filterstrecken gepumpt wurde, konnte in zwei Fördertests (hydraulische Untersuchungen) in der Bohrung Ktzi200 ein Zufluss aus der Stuttgart-Formation erzielt und damit eine Verbindung zum Speicherhorizont nachgewiesen werden. Dennoch wurde aus Vorsichtsmaßnahmen entschieden, die Bohrung Ktzi200 nicht wie geplant als Injektionsbohrung, sondern als Beobachtungsbohrung zu nutzen und die Bohrung Ktzi201 als Injektionsbohrung zu komplettieren. Die Komplettierung bildet den Abschluss der Einbauarbeiten, bei der der CO₂-Injektionsstrang in die Verrohrung eingeschoben und mit einem Packer zu der Verrohrung abgedichtet wird.

Die hydraulische Verbindung des Speicherbereichs der Bohrung Ktzi202 zu den Bohrungen Ktzi200 und Ktzi201 konnte ebenfalls mithilfe von hydraulischen Tests nachgewiesen werden (Wiese *et al.*, 2010). Damit war die Voraussetzung gegeben, dass die Sandsteinschichten des Speicherhorizontes zwischen den drei Bohrungen hydraulisch miteinander verbunden sind und sich das injizierte CO₂ auch zwischen den Bohrungen ausbreiten kann.

Aufgrund der Nutzungsänderung der drei Bohrungen verkleinerte sich der Beobachtungsbereich zwischen den Bohrungen für die geoelektrischen Messungen im Bohrloch. Ursprünglich sollte sich die Injektionsbohrung im rechten Winkel der Dreiecksanordnung befinden, was so aufgrund der Fehlzementation nicht realisiert werden konnte. Zur Injektion wurde nun die Bohrung Ktzi201 genutzt. Sie befand sich im spitzen Winkel im Westen der Dreiecksbohrlochanordnung (siehe Abb. 2.7 in Kap. 2.3.3.3). Das verschlechterte die Ausgangsbedingungen der geoelektrischen Überwachung der CO₂-Speicherung. Bei unbekannter CO₂-Ausbreitungsrichtung eignete sich die am CO₂-Speicherstandort Ketzin gewählte Dreiecks-Bohrlochanordnung dennoch besser als beispielsweise eine Linienanordnung der drei Bohrungen wie am CO₂-Speicherstandort Cranfield. Die Bohrlochmessenanordnung wird ausführlich im Kapitel 4.6 betrachtet und diskutiert.

4.2 Phase I: Installation, Einbau und Zementation der Bohrlochelektroden

Um geoelektrische Messungen im Bohrloch und geoelektrische Messungen kombiniert an der Erdoberfläche und in den Bohrungen reibungslos durchzuführen und aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, sind bestimmte Voraussetzungen bei der Installation und dem Einbau der Elektroden am Standort Ketzin notwendig. Dazu gehören u.a. die Kenntnis der genauen Lage der permanent installierten Bohrlochelektroden im Untergrund, ihr Anschluss ans Messkabel, ihre Wirkung als Punktelektrode und ihre Ankopplung an den geologischen Untergrund. Diese Voraussetzungen sollten mit der Installation, dem Einbau und der Zementation der Bohrlochelektroden in alle drei Bohrungen in Phase I umgesetzt und gewährleistet, sowie mithilfe elektrischer (Ankopplungs-)Messungen überprüft und überwacht werden. Diese geoelektrische Messungen im Bohrloch wurden mit der Geoelektrikapparatur GeoTom (Geolog2000, Deutschland) durchgeführt.

Folgende Maßnahmen sollten realisiert werden:

- Bestimmung der exakten relativen Tiefenlage der Bohrlochelektroden in allen drei Bohrungen
- Überprüfung der elektrischen Verbindung zwischen installierter Elektrode und Bohrlochmesskabel (unter Tage)
- Kontrolle der isolierten Verrohrung (Außenbeschichtung) auf Beschädigung (über Tage)
- Überwachung der Zementation der Elektroden im unteren Bohrlochringraum der Bohrung Ktzi200.

Eine erschwerende Randbedingung war, dass die durchgeführten Kontrollmessungen den Installationsbetrieb nicht behindern oder verzögern durften. Es sollte zudem geprüft werden, in wie weit diese Kontrollmessungen zur Überwachung der Installation, des Einbaus und der Zementation der Bohrlochelektroden in Phase I geeignet und anwendbar sind.

4.2.1 Exakte Elektrodenpositionierung

Für die Anwendung von geoelektrischen Messungen ist die Kenntnis der genauen Position der Bohrlochelektroden auf der isolierten Verrohrung im Untergrund von großer Bedeutung. Ist der Bohrlochverlauf bekannt (siehe Kap. 3.2.3), lässt sich die Lage im Raum (x-, y-, z-Koordinaten der Bohrlochelektroden) leicht aus der relativen Tiefenlage (d.h. aus dem Abstand zwischen den Elektroden entlang der isolierten Verrohrung)

errechnen. Die Koordinaten der Bohrlochelektroden sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst. Erschwert wurde die Elektrodenpositionierung durch die Umstände, dass der Installations- und Einbauprozess nicht unnötig verzögert werden durfte und die Rohre rund 800 m in die Tiefe reichten. Die Elektrodenpositionierung musste über eine lange Strecke überwacht werden und konnte nach dem Einbau ins Bohrloch von außen nicht mehr nachgeprüft werden.

Eine Möglichkeit der Bestimmung der exakten relativen Tiefenlage der Bohrlochelektroden bot eine Nummerierung und ein Vermessen der Einzelrohre, die produktionsbedingt ungleich lang sind, bereits auf dem Bohrplatz, sowie eine Markierung der Elektrodeneinbautiefen. Diese Möglichkeit barg allerdings logistische Schwierigkeiten. Es wäre ein größerer zeitlicher Vorlauf erforderlich gewesen. Ein Vertauschen oder Auslassen der Rohre beim Einbau würde zusätzliche Fehlerquellen implizieren.

Um die relative Tiefenlage der Bohrlochelektroden mit wenig Aufwand und mit geringer Fehleranfälligkeit zu bestimmen, wurden während der Installation nichtleitende Maßbänder an der isolierten Verrohrung mitgeführt. Nach Erreichen der Endteufe (810 m (u GOK)) in der Bohrung Ktzi200 wurde eine 5,5“ Verrohrung (entspricht einem Durchmesser von rund 14 cm) in die Bohrung eingebaut (Prevedel *et al.*, 2008). Dabei wurde das unterste Edelstahlrohr (Einzelrohrlänge rund 10 m) mit einer Hebevorrichtung vom Bohrplatz über eine Rampe auf den Bohrtisch gezogen und ins Bohrloch eingelassen. Das nächste Rohr wurde anschließend ebenfalls auf den Bohrtisch (Abb. 4.1, mitte) gehoben und mithilfe einer Zange im Bohrrhrkeiltopf (engl.: *casing spider*; Abb. 4.1, rechts unten) mit dem untersten, bereits eingelassenen Rohr verschraubt. Beide Rohre wurden nun weiter zusammen ins Bohrloch eingelassen. Nach rund 70 m eingebauter Verrohrung wurde das erste isolierte Edelstahlrohr mit vorinstalliertem Verrohrungszentrierkorb (Centralizer) vom Bohrplatz gehoben und über eine Rampe auf den Bohrtisch gezogen. Dabei schützten Spezialbänder und ein ans Rohrende aufgezogener Rohrschuh die Isolierung vor mechanischer Beschädigung (Abb. 4.1, links: von oben nach unten). Ab der Unterkante des ersten (untersten) isolierten Rohres wurde das Maßband mitgeführt (0 m) und an der isolierten Verrohrung mit Gebewebeklebeband fixiert (Abb. 4.1, oben rechts und Abb. 4.2, rechts), damit es jeweils eng an der Verrohrung anliegt, keine Schlaufen bildet und nicht verrutscht.

Die Länge bzw. die Elektrodenabstände wurden somit von unten nach oben gemessen und dann später auf die relativen Tiefen und die Raumkoordinaten umgerechnet. Die Genauigkeit des Ablesens der Länge sollte somit mindestens die Hälfte der

Elektrodenhöhe betragen: die geforderte Ablesegenauigkeit liegt bei rund 5 cm. Die erste Ring-Elektrode (entspricht Elektrode 15, unterste Elektrode in Ktzi200) wurde nach rund 6 m auf der isolierten Verrohrung installiert und mithilfe eines Klemmkeils fixiert (Abb. 4.2, links). Nach der Installation aller 15 Bohrlochelektroden auf der isolierten Verrohrung in der Bohrung Ktzi200 folgte abschließend der Einbau der 47 Edelstahlrohre bis zur Erdoberfläche.

Erstmals wurde der Einbau von nichtleitenden Maßbändern zur Bestimmung der exakten relativen Tiefe der Bohrlochelektroden erfolgreich angewandt. Es wird ersichtlich, dass die Nutzung von Maßbändern einfach, unkompliziert umsetzbar und kostengünstig ist.

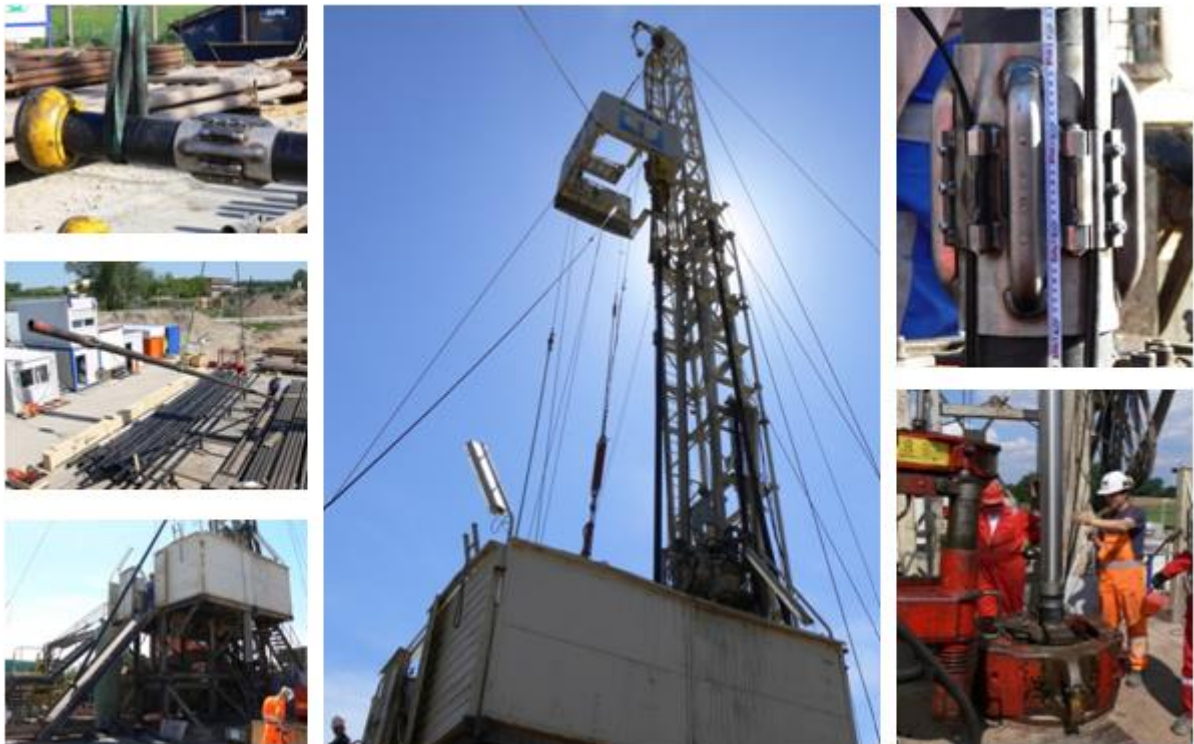


Abb. 4.1: Bohrlocharbeiten an der Beobachtungsbohrung Ktzi200: Ein isoliertes Edelstahlrohr mit vorinstalliertem Centralizer wird vom Bohrplatz gehoben und über eine Rampe auf den Bohrtisch gezogen. Dabei schützen Spezialbänder und ein ans Rohrende aufgezogener Rohrschuh die Isolierung vor mechanischer Beschädigung (links, von oben nach unten). Bohrturm mit Bohrtisch (mitte). Fixierung eines Centralizers an der isolierten Verrohrung sowie Bestimmung der Einbautiefe mittels mitgeführtem Maßband (rechts oben). Die Verschraubung der Edelstahlrohre erfolgte über einen Bohrruhrkeiltopf mit einer Zange (rechts unten) (Fotos: Deutsches GeoForschungsZentrum Potsdam, 2007).

Tab. 4.2: Oben: Auf ein externes Koordinatensystem festgelegte Koordinaten x, y, z der 45 Vertikalelektroden in den drei Bohrungen (Elektroden 1 bis 15 in Ktzi200, Elektroden 16 bis 30 in Ktzi201 und Elektroden 31 bis 45 in Ktzi202). Die Bohrlochabweichung ist in den Koordinaten berücksichtigt. Die Tiefen z entsprechen den Höhen über Normalnull (ü. NN). Unten: Gauß-Krüger-Koordinaten (Potsdam Datum, Bessel-Ellipsoid) der drei Bohrungen (links) und die auf ein externes Koordinatensystem festgelegten Koordinaten x, y, z. Die z-Koordinate entspricht in diesem Fall der Oberkante der jeweiligen Bohrung (ü. NN).

	x in m	y in m	z in m		x in m	y in m	z in m
Beobachtungsbohrung Ktzi200				Injektionsbohrung Ktzi201			
Elektrode 1	-3,12	1,51	-562,01	Elektrode 16	-49,58	-1,30	-562,48
Elektrode 2	-3,21	1,73	-571,99	Elektrode 17	-49,62	-1,21	-572,47
Elektrode 3	-3,33	1,95	-581,97	Elektrode 18	-49,67	-1,12	-582,46
Elektrode 4	-3,47	2,14	-591,95	Elektrode 19	-49,71	-1,02	-592,44
Elektrode 5	-3,59	2,25	-601,91	Elektrode 20	-49,73	-0,90	-602,63
Elektrode 6	-3,67	2,31	-612,64	Elektrode 21	-49,74	-0,82	-610,10
Elektrode 7	-3,72	2,39	-621,00	Elektrode 22	-49,77	-0,69	-621,35
Elektrode 8	-3,77	2,53	-630,98	Elektrode 23	-49,79	-0,59	-629,50
Elektrode 9	-3,81	2,71	-640,98	Elektrode 24	-49,83	-0,46	-639,51
Elektrode 10	-3,87	2,94	-651,07	Elektrode 25	-49,87	-0,36	-649,51
Elektrode 11	-3,94	3,19	-660,95	Elektrode 26	-49,91	-0,26	-659,50
Elektrode 12	-4,02	3,41	-669,72	Elektrode 27	-49,94	-0,15	-669,50
Elektrode 13	-4,11	3,60	-679,71	Elektrode 28	-49,98	-0,04	-679,48
Elektrode 14	-4,24	3,82	-689,63	Elektrode 29	-50,03	-0,11	-689,47
Elektrode 15	-4,37	4,00	-700,27	Elektrode 30	-50,10	-0,27	-699,69
Beobachtungsbohrung Ktzi202							
Elektrode 31	2,36	100,72	-555,47				
Elektrode 32	2,39	100,82	-565,46				
Elektrode 33	2,43	100,96	-575,43				
Elektrode 34	2,48	101,15	-585,73				
Elektrode 35	2,52	101,37	-596,27				
Elektrode 36	2,54	101,59	-605,32				
Elektrode 37	2,55	101,89	-616,03				
Elektrode 38	2,52	102,15	-624,50				
Elektrode 39	2,45	102,46	-634,46				
Elektrode 40	2,34	102,74	-644,42				
Elektrode 41	2,24	103,01	-654,42				
Elektrode 42	2,19	103,23	-664,40				
Elektrode 43	2,16	103,41	-675,35				
Elektrode 44	2,16	103,60	-684,34				
Elektrode 45	2,18	103,81	-693,86				
	Rechtswert	Hochwert	Höhe in m (ü. NN)		x in m	y in m	z in m
Ktzi200	4559104	5817905	34	Ktzi200	0	0	34
Ktzi201	4559053	5817903	34	Ktzi201	-50	0	34
Ktzi202	4559107	5818001	34	Ktzi202	0	100	34



Abbildung 4.2: Installation der Ring-Elektrode auf der isolierten Verrohrung. Zur Fixierung wird ein Klemmkeil in die vorgesehene Öffnung geschlagen (links). Edelstahl-Elektrode auf der isolierten Verrohrung (schwarze Beschichtung) mit elektrischem Messkabel (schwarz, außen am Casing geführt) und mitgeführtem Maßband zur Bestimmung der relativen Einbautiefe (rechts) (Fotos: Deutsches GeoForschungsZentrum Potsdam, 2007).

4.2.2 Kontrolle der isolierten Verrohrung auf Beschädigung

In Ketzin sollten in drei Bohrungen jeweils 15 Punktelektroden genutzt werden. Um die auf der Verrohrung angeklebten Bohrlochelektroden auch als Punktelektroden nutzen zu können, war eine elektrische Isolierung der Bohrlochelektroden gegen die Edelstahl-Verrohrung notwendig. Im Tiefenbereich von 525 m bis 745 m (u GOK) wurde die Verrohrung daher mit einer speziellen Zwei-Komponenten-Außen-beschichtung (Ryt-Wrap™) überzogen (Prevedel *et al.*, 2008). Während der Einbauphase durfte die Isolierung nicht beschädigt werden.

Da die Nutzung von Punktelektroden in Bohrungen nicht State-of-the-Art war, werden der Einbau der isolierten Verrohrung und die vorgenommenen Vorsichtsmaßnahmen in diesem Kapitel beschrieben. Der Schwerpunkt lag allerdings auf der anschließenden elektrischen Kontrolle der Isolierung.

Für den Einbau der Verrohrung in die Bohrung wurden die isolierten Rohre mithilfe einer Hebevorrichtung über eine Rampe auf den Bohrtisch hochgezogen, auf dem sie dann miteinander verschraubt und ins Bohrloch eingebaut wurden. Spezialbänder und ein Rohrschuh schützten die Isolierung vor mechanischer Beschädigung (Abb. 4.1, links). Beim Verschrauben wirkten hohe Verschraubmomente auf die elektrisch isolierte Außenbeschichtung der Edelstahlrohre. Um diese Spezialbeschichtung bei der Installation nicht zu beschädigen, durften weder die Bohrlochelektroden noch die Centralizer auf der Verrohrung verrutschen. Um die Außenisolation zu schonen, kam zur Befestigung der Elektroden und der Centralizer nur eine Klemmung in Frage.

Beim Anklemmen auf die isolierte Verrohrung, sowie während des Verschraubens der einzelnen isolierten Rohre kann es dennoch zu Beschädigungen der Isolierung kommen. Neben einer Sichtkontrolle und einer prophylaktischen Umwicklung möglicher Isolierfehlstellen mit elektrisch nicht leitendem Gewebetextilklebeband fand direkt nach dem jeweiligen Anbringen der Bohrlochelektrode die elektrische Kontrolle der isolierten Verrohrung auf Beschädigung übertage statt. Nach der Kontrolle wurde die jeweilige Ring-Elektrode mit dem Messkabel verbunden und zusammen mit der Verrohrung ins Bohrloch eingebaut.

Der Wettereinfluss stellte eine weitere Herausforderung dar. (Niesel-)Regen verursachte einen dünnen Wasserfilm auf der isolierten Verrohrung und führte somit zu einem Stromfluss zwischen Verrohrung und Elektrode. Der gleiche Messeffekt würde bei einer beschädigten Außenbeschichtung der Verrohrung auftreten. Es würden elektrische Ströme fließen, die zu sehr niedrigen elektrischen Ankopplungs-widerständen führen würden. Eine schnell durchzuführende Vorsorgemaßnahme war die Trocknung der Bereiche der isolierten Verrohrung, an die die jeweilige Elektrode installiert werden sollte. Mit einem Tuch wurden die entsprechenden Bereiche direkt vor dem Anklemmen der Elektrode getrocknet. Die Maßnahmen durften den zeitlichen bohrtechnischen Ablauf nicht verzögern und sollten realistisch, schnell und kostengünstig durchführbar sein. Eine Totalüberdachung von Bohrtisch und dem Lagerplatz mit den Verrohrungsstücken wäre weder praktikabel noch ökonomisch gewesen. Besondere Maßnahmen müssten in Gebieten hoher Luftfeuchtigkeit getroffen werden.

4.2.2.1 Versuchsaufbau und Datenakquisition

Um zu kontrollieren, ob die Isolierung der Verrohrung beim Einbau unbeschädigt geblieben war, wurden nach jedem Elektrodenanklemmen elektrische Ankopplungsmessungen durchgeführt. Es wurde der Ankopplungswiderstand zwischen der installierten Elektrode (übertage) und dem Bohrtisch (auch: Drehtisch; engl.: *rotary table*) gemessen (Abb. 4.3). Dafür wurde zwischen der angebrachten Elektrode und dem Bohrtisch ein elektrischer Strom von 5 mA bis 50 mA injiziert und der elektrische Spannungsabfall gemessen. Da aus logistischen Gründen kein Zugang zum Inneren der Verrohrung über das obere Ende der jeweiligen isolierten Rohre vorlag, wurde stattdessen der Bohrtisch als elektrischer Kontakt genutzt. Hohe Ankopplungswiderstände im Megaohm-Bereich weisen auf eine unbeschädigte Isolierung hin.

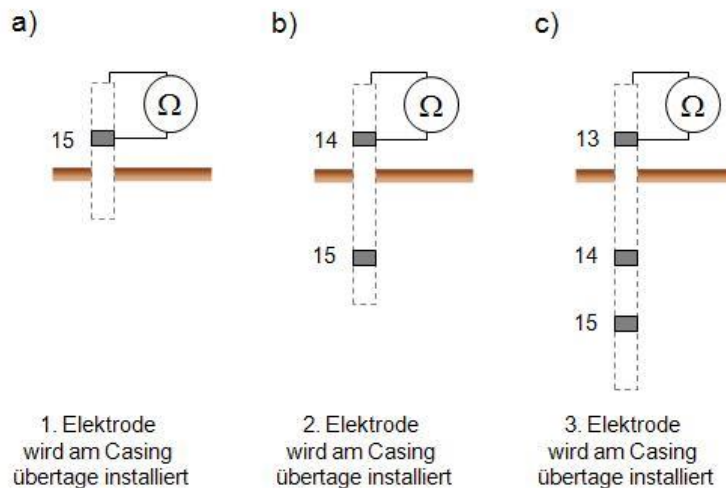


Abb. 4.3: Prinzipskizze der Installationsüberwachung in Phase I: a) bis c) Kontrolle der isolierten Verrohrung zwischen den ersten drei eingebauten Elektroden im Bohrloch Ktzi200.

4.2.2.2 Ergebnisse

Exemplarisch für die Kontrolle der isolierten Verrohrung auf Beschädigung ist das Beispiel der Messungen in der Bohrung Ktzi200 angeführt. Die Ergebnisse der einzelnen Isolationsmessungen (auch: *Ankopplungsmessungen*) zwischen jeder der 15 Elektroden und dem Bohrtisch sind in Abbildung 4.4 dargestellt.

Die Isolationswiderstände liegen bei rund 3,5 MΩ. Die Abweichungen der einzelnen Isolationswiderstände vom Mittelwert betrugen 0,9 bis 2,4 %. Der Isolationsswiderstand zwischen installierter Elektrode 12 gegen den Bohrtisch wich mit einem Wert von 2,7 MΩ mit 20,9 % vom Mittelwert der restlichen Isolationswiderstände ab. Allerdings lagen alle Messwerte im Megaohm-Bereich.

Die Messungen zur Kontrolle der isolierten Verrohrung auf Beschädigung ergaben für die Installation der Bohrlochelektroden in die Bohrung Ktzi201 (Elektroden 16 bis 30) und in die Bohrung Ktzi202 (Elektroden 31 bis 45) ähnliche Messwerte wie die Messungen in der Bohrung Ktzi200.

4.2.2.3 Interpretation und Diskussion

Die gemessenen Isolationswiderstände im Megaohm-Bereich bestätigten eine unbeschädigte Isolierung der Außenbeschichtung der Edelstahlrohre.

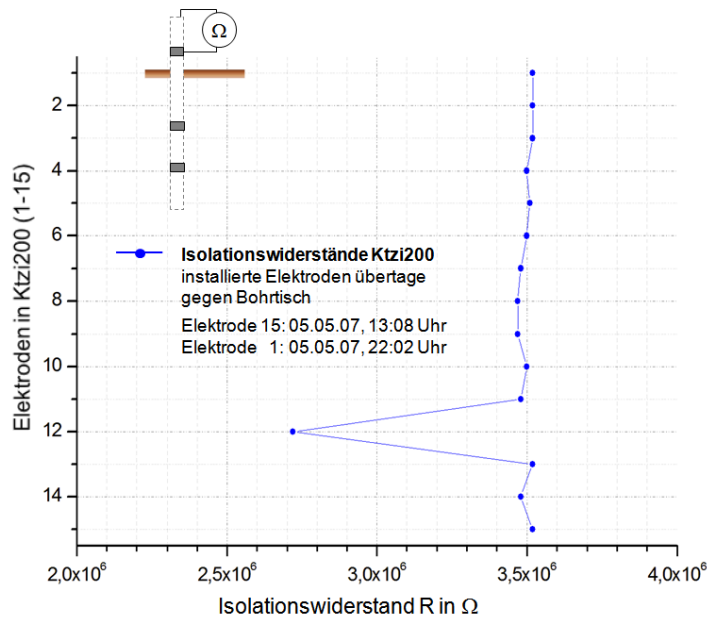


Abb. 4.4: Darstellung der gemessenen Isolationswiderstände zwischen jeder einzelnen, auf der Verrohrung installierten Elektrode (1 bis 15 in der Bohrung Ktzi200) und dem Bohrtisch sowie der Prinzipskizze der Messungen (links oben).

Die Isolationsmessungen der Bohrung Ktzi201 bei Nieselregen brachten vorerst niedrigere Isolationswiderstände, da sich zwischen installierter Elektrode und beschichteter Verrohrung ein Wasserfilm bildete und somit die Beschädigung der Verrohrung simulierte. Eine erneute Installation der betroffenen Elektrode an die getrocknete Verrohrung brachte analog zum Einbau der Elektroden in die Bohrung Ktzi200 Isolationswiderstände im Megaohm-Bereich und bestätigte, genau wie die Messungen an der Bohrung Ktzi202, dass die Isolierung der Außenbeschichtung während der Verschraubung der einzelnen isolierten Rohre und beim anschließenden Elektrodenanbringen unbeschädigt blieb.

Mit den beschriebenen Ankopplungsmessungen ließen sich Beschädigungen der Isolierung, die während des Einbaus in die Bohrung und innerhalb der Bohrung auftreten könnten (z.B. Verrutschen der Centralizer), nicht nachweisen, da die Messungen zwischen installierter Elektrode übertage und dem Bohrtisch vor dem Einbau in die jeweilige Bohrung erfolgten. Ein Isolationstest zwischen bereits untertage befindenden Elektroden und dem Bohrtisch konnte aus zeitlichen Gründen nicht realisiert werden.

Die Gründe für die Abweichungen der Isolationswiderstände innerhalb einer Bohrung, wie sie bei Elektrode 12 (Ktzi200) auftraten, konnten nicht geklärt werden. Da alle Messwerte im Megaohm-Bereich lagen und somit auf eine unbeschädigte

Außenbeschichtung der Edelstahlrohre hindeuten, wird nicht näher darauf eingegangen. In den Bohrungen Ktzi201 und Ktzi202 traten ähnliche Abweichungen auf.

Die elektrischen Ankopplungsmessungen bestätigen den erfolgreichen Einbau der isolierten Verrohrung und schließen eine Beschädigung während der Installation der Elektroden aus. Alle 45 Punktelektroden sind voll funktionstüchtig und als solche nutzbar.

4.2.3 Überprüfung der Verbindung zwischen installierter Elektrode und Messkabel

Eine zuverlässig funktionierende Verbindung zwischen den installierten Elektroden und der Messapparatur über das eingebaute Messkabel war eine grundlegende Voraussetzung für das Durchführen der geoelektrischen Messungen. Insbesondere der Einbau der Elektroden mit dem Messkabel zusammen ins Bohrloch barg die Gefahr einer Beschädigung der sensiblen Messtechnik durch die schweren Bohrlochgerätschaften. Kabelmantelbeschädigungen beispielsweise hätten das Eindringen von Formationsfluiden ins Kabelinnere zur Folge und würden zu Kurzschlussmessungen zwischen den Einzelleitungen innerhalb des Kabelmantels und folglich zum Elektrodenausfall führen. Potentielle Risiken bei der Installation waren u.a.:

- das Hängenbleiben der Kabelausführungen (Verbindungsstecker) beim Abspulen der Messkabel von der Kabeltrommel
- das Hängenbleiben beim Einfädeln an den Umlenkrollen zum kontrollierten Einbringen der Kabel in die Bohrung
- das Hängenbleiben bei der Installation in die Bohrung selbst
- die Beschädigung oder Durchtrennung des Messkabels bei der Installation in die Bohrung
- das Lösen der Verbindungsstecker zwischen dem Messkabel und der Elektrode während des Einbaus in die Bohrung.

Nach dem jeweiligen Ankleben der Bohrlochelektroden auf der isolierten Verrohrung wurden sie mit einem druck- und wasserdichten Verbindungsstecker am 15-adrigen Bohrlochmesskabel befestigt (Schmidt-Hattenberger *et al.*, 2011). Um sicherzustellen, dass eine Verbindung zwischen eingebauter Elektrode und eingebautem Messkabel vorlag und es zu keiner Kabeldurchtrennung während des Einbaus in die Bohrung kam, wurden während der gesamten Installation der Bohrlochelektroden und während des Einbaus in die jeweilige Bohrung elektrische Ankopplungsmessungen durchgeführt. Eine

Überprüfung während des Einbaus sorgte für einen gewissen Handlungsspielraum zum Nachbessern. Ein kompletter Ausbau zur Nachbesserung kam nach Einbauende in die Bohrung aus Bohrkosten- und Risikogründen nicht in Frage. Kabelmantelbeschädigungen können mit dieser Methode nicht detektiert werden.

4.2.3.1 Versuchsaufbau und Datenakquisition

Exemplarisch für die Überprüfung der Verbindung jeweils zwischen der installierten Elektrode und dem Messkabel sind an dieser Stelle die Messungen in der Beobachtungsbohrung Ktzi200 beschrieben.

Nach der Installation (Anklemmen) jeder einzelnen Bohrlochelektrode auf der isolierten Verrohrung und dessen Einbaus in die Bohrung wurden elektrische Ankopplungsmessungen zwischen den sich bereits im Bohrloch in der Bohrspülung befindenden benachbarten Elektroden durchgeführt (Abb. 4.5). Die erste Ankopplungsmessung erfolgte nach dem Einbau der Elektroden 15 und 14 zwischen diesem Elektrodenpaar. Insgesamt wurden 14 Ankopplungsmessungen mit jeweils 1 bis 14 Messwerten während des Elektrodeneinbaus in die Bohrung aufgenommen.

Nach dem erfolgreichen Einbau der 15 Elektroden wurden während des Einbaus der folgenden (nicht-isolierten) Rohre weitere 47 Ankopplungsmessungen mit jeweils 14 Messwerten zwischen den jeweils benachbarten Elektroden durchgeführt. Durch den Einbau dieser Edelstahlrohre erreichten die Bohrlochelektroden auf der isolierten Verrohrung ihre Zielposition in der Tiefe. Die Verbindung zwischen Elektrode und Messkabel wurde weiter auf ihre Funktionstüchtigkeit überwacht.

Beim Ankopplungstest wurde der Übergangswiderstand (auch: *Ankopplungswiderstand*) zwischen jeweils zwei benachbarten Elektroden gemessen, indem zwischen zwei Elektroden ein elektrischer Strom von 5 mA bis 50 mA injiziert und der elektrische Spannungsabfall gemessen wurde. Hohe Ankopplungswiderstände im Megaohm-Bereich weisen auf eine sehr schlechte Ankopplung hin. Beim Elektrodeneinbau am Standort Ketzin hätten hohe Widerstände auf eine fehlende Verbindung zwischen Elektrode und Messkabel bzw. auf ein durchtrenntes Messkabel hingedeutet. Niedrige Ankopplungswiderstände im Ohm- bis Kiloohm-Bereich zeigten, dass die Elektroden ans Messkabel angeschlossen waren und eine elektrische Verbindung vorlag.

4.2.3.2 Ergebnisse

Es wurden insgesamt 61 Einzel-Ankopplungsmessungen zwischen den eingebauten, benachbarten Elektroden nach dem Einbau jeder einzelnen Rohrtour (Verrohrung) in der Bohrung Ktzi200 durchgeführt. Die Ergebnisse der Ankopplungsmessungen während der Installation der Elektroden 1 bis 15 sind anhand von zwei Beispiel-messkurven in Abbildung 4.6 dargestellt. Zum Zeitpunkt der Messung Nr. 14 waren alle 15 Elektroden auf der isolierten Verrohrung im Bohrloch installiert. Die Elektrode 1 befand sich zu diesem Zeitpunkt somit oberflächennah und die Elektrode 15 (aufgrund des Elektrodenabstandes von rund 10 m) in rund 140 m Tiefe (u GOK). Die zweite Beispielmesskurve (Nr. 61) zeigt die letzte Messung während des Einbaus. Alle Elektroden befinden sich dabei in endgültiger Einbautiefe (596 m bis 734 m (u GOK), siehe Tab. 4.1).

Während der beiden Messungen wurden Ankopplungswiderstände von rund $148\ \Omega$ gemessen. Die beiden Messkurven 14 und 61 sind im Verlauf ähnlich. Die Abweichungen der Ankopplungswiderstände betragen lediglich 0,2 bis 2,8 %. Die Abweichungen der einzelnen Ankopplungswiderstände vom Mittelwert betragen bei der 14. Messung 0,1 bis 3,7 % und bei der 61. Messung 0,1 bis 1,5 %.

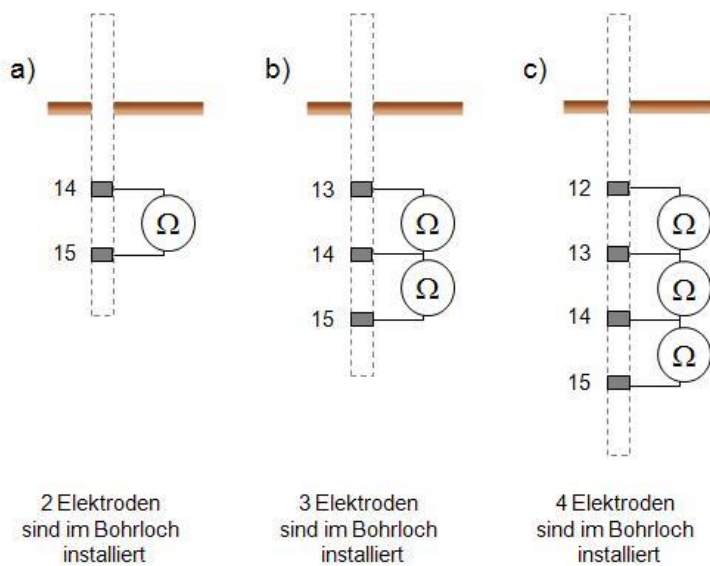


Abb. 4.5: Prinzipskizze der Installationsüberwachung in Phase I: a) bis c) Überprüfung der Verbindung zwischen installierter Elektrode und Messkabel mit fortschreitendem Einbau ins Bohrloch Ktzi200.

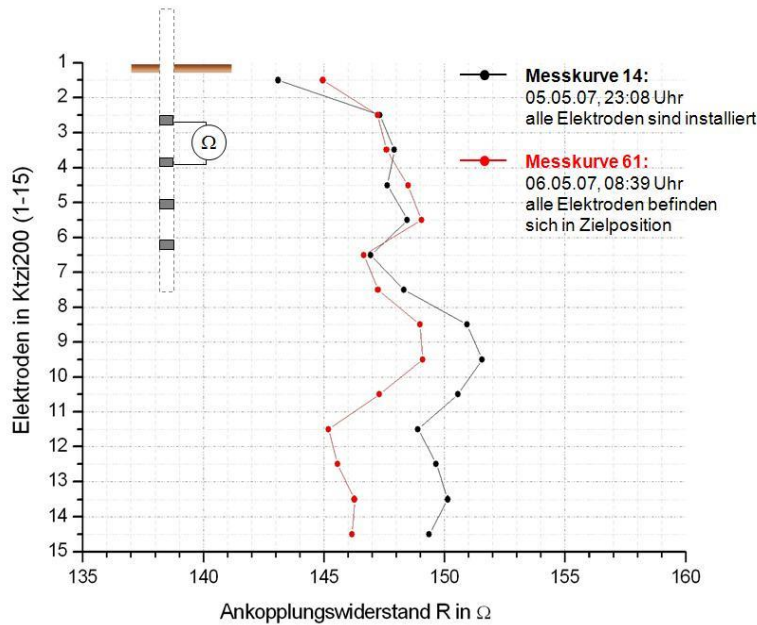


Abb. 4.6: Darstellung der gemessenen Ankopplungswiderstände zwischen den jeweils benachbarten Elektroden in der Bohrung Ktzi200 und der Prinzipskizze der Messungen (links oben). Während der Messung 14 (schwarz) waren alle 15 Elektroden in der Bohrung installiert, die Elektrode 1 befand sich dabei oberflächennah und die Elektrode 15 in rund 140 m Tiefe (u GOK). Während der Messung 61 (rot) befanden sich alle 15 Elektroden in Zielposition (Elektrode 1 in 596 m (u GOK) und Elektrode 15 in 734 m (u GOK) Tiefe).

Abbildung 4.7 zeigt die zeitliche Stabilität der Ankopplungswiderstände zwischen den bereits eingebauten, benachbarten Elektroden während der gesamten Installations- und Einbauphase in der Bohrung Ktzi200. Die Ankopplungswiderstände zwischen den benachbarten Elektroden sind farbcodiert über der Nummer der Einzelmessung (entspricht der fortschreitenden Installations- und Einbauzeit) aufgetragen. Die Ankopplungswiderstände während der Elektrodeninstallation sind bis zu 10 % größer als die während des Einbaus der restlichen nicht-isolierten Verrohrung gemessenen Ankopplungswiderstände zwischen den benachbarten Elektroden. Vereinzelt traten höhere Ankopplungswiderstände zwischen den Elektroden 15 und 14 auf. Die genauen Daten (Datum, Uhrzeit, Installationsfortschritt) der Ankopplungsmessungen sind in Tabelle A.1 zusammengefasst.

4.2.3.3 Interpretation und Diskussion

Die gemessenen Ankopplungswiderstände im einstelligen Ohmbereich sind charakteristisch für Ankopplungsbedingungen im feuchten Untergrund wie im Beispiel der Bohrspülung. Ankopplungsmessungen an der Erdoberfläche würden in trockenen

Sanden zu Werten von rund $10\text{ k}\Omega$ führen, während feuchte Böden Ankopplungswiderstände von bis zu $0,3\text{ k}\Omega$ verursachen.

Die Abweichungen der Messwerte der Ankopplungswiderstände innerhalb einer Messung zwischen den jeweils benachbarten und installierten Elektroden lagen im Fehlerbereich der Messapparatur. Die Abweichungen der Ankopplungswiderstände zwischen den beiden Beispielmessungen waren systematisch. Ihr Ursprung wurde nicht abschließend geklärt. Aufgrund des zeitlichen Fortschreitens der Elektroden-installation und des Einbaus der restlichen Rohre in die Bohrung, befanden sich die Elektroden während beider Messungen in der Bohrspülung in unterschiedlicher Bohrlochtiefe. Somit könnten unterschiedliche Umgebungstemperaturen als auch unterschiedliche elektrische Widerstände der Bohrspülung zu den systematischen Verschiebungen der Ankopplungswiderstände geführt haben. Da sich die Werte innerhalb der Messfehler befanden, war die systematische Ursache der Abweichungen ohne Belang.

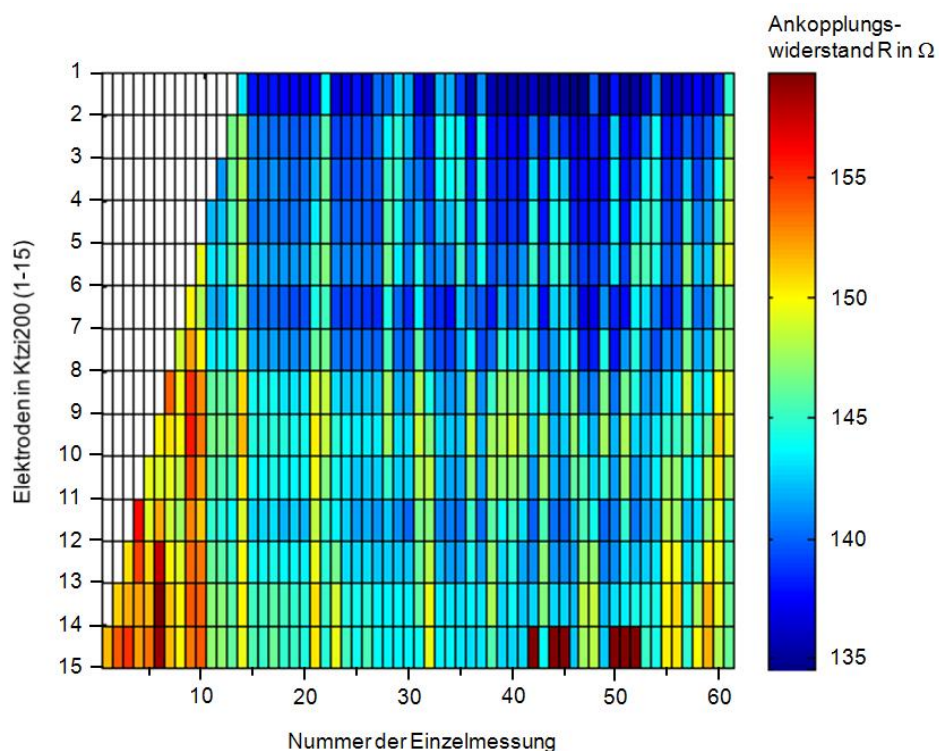


Abb. 4.7: Darstellung der gemessenen Ankopplungswiderstände zwischen den jeweils benachbarten Elektroden in der Bohrung Ktzi200, farbcodiert über der Installations- und Einbauzeit aufgetragen. Messungen 1 bis 14 zeigen die Ankopplungswiderstände während der Installation der 15 Elektroden, während bei den Messungen 15 bis 61 bereits alle Elektroden installiert sind und durch den anschließenden Einbau der restlichen Rohrtouren in die Zielposition gebracht wurden.

Da eine fehlende Verbindung zwischen Elektrode und Messkabel sowie eine Kabeldurchtrennung Ankopplungswiderstände im Megaohm-Bereich zur Folge gehabt

hätten, konnte eine Durchtrennung des Messkabels während der Installation und des Einbaus ausgeschlossen werden. Zusätzlich durchgeführte Reflexionsmessungen (auf Impulsreflexionen basierende Standardmessungen; engl.: *Time Domain Reflectometry, TDR*) zur Bestimmung der Kabellänge brachten ebenfalls keinen Hinweis auf ein durchtrenntes Messkabel und damit auf eine Kabelbeschädigung während des Einbaus. Ob der Kabelmantel beschädigt wurde und somit das Eindringen von Fluiden ins Kabelinnere ermöglicht war, konnte weder mit den elektrischen Ankopplungsmessungen noch mit den Reflexionsmessungen geklärt werden.

Ebenso ergaben die elektrischen Ankopplungsmessungen während der Installation der Elektroden in die Bohrung Ktzi201 (Elektroden 16 bis 30) und in die Bohrung Ktzi202 (Elektroden 31 bis 45), dass der Anschluss der Elektroden an das Messkabel vorlag und eine Durchtrennung des Messkabels während der Installation ausgeschlossen werden konnte. Somit waren alle 45 Elektroden nach der Installation und dem Einbau in jede Bohrung mit dem jeweiligen Messkabel verbunden.

Weiterführende Messungen zur zeitlichen Stabilität der Ankopplungswiderstände in der Zeit bis zum Start der CO₂-Injektion (Phase II) werden an anderer Stelle untersucht und im Kapitel 4.4.1 betrachtet.

4.2.4 Überwachung der Zementation der Elektroden im Bohrlochringraum

Nach dem Einbau der Verrohrung zusammen mit den Elektroden wurde der Zwischenraum zur Bohrlochwand (Bohrlochringraum) mit Zement verfüllt. Die Filterbereiche durften dabei nicht zementiert werden, um den Zugang zum Gebirge zu gewährleisten. Abdichtelemente im Bohrlochringraum sollen ein Fließen des Zementes über die Filterstrecken und damit ein Verstopfen der Filterschlitz verhindern. Somit durften alle drei Bohrungen nur teilzementiert werden. Während der Zementation der unteren Elektroden im Ringraum der Bohrung Ktzi200 ergab sich die Gelegenheit, während des Zementationsprozesses die Ankopplungswiderstände zu messen. Aufgrund des Zementwiderstandes und aufgrund der Verdrängung des Formationswassers und der Bohrlochspülung durch den Zement im Bohrlochringraum wurde eine messbare Widerstandsveränderung erwartet, sobald der Zement die Elektrodenhöhe erreichen würde. Mithilfe von elektrischen Ankopplungsmessungen zwischen bereits zementierten und nicht zementierten Elektroden sollte der Zementationsprozess in Ktzi200 zeitlich überwacht werden.

4.2.4.1 Versuchsaufbau und Datenakquisition

Die Zementation der Rohre (Abb. 4.8) in der Bohrung Ktzi200 wurde in zwei Etappen durchgeführt. Geplant waren folgende Schritte:

- Stingerzementation (unterer Bohrlochbereich) vom Rohrschuh bis 10 m unterhalb der Filterschrecken des unteren Filterrohres: geplante Zementsäule im Ringraum von 805 m bis 710 m (u GOK)
- Stopfenzementation (oberer Bohrlochbereich) vom Quellpacker (17 m oberhalb des obersten Filterrohres) bis 385 m: geplante Zementsäule im Ringraum von 620 m bis 385 m (u GOK).

Bei der Stingerzementation am 07.05.2007 sollten die Elektroden 13, 14 und 15 zementiert werden, bei der Stopfenzementation am 11.05.2007 die Elektroden 1, 2 und 3.

Da flüssiger Zement mit rund $0,13 \Omega\text{m}$ einen deutlich höheren Widerstand aufwies als das durch ihn verdrängte Formationswassers (rund $0,05 \Omega\text{m}$) und die Bohrspülung, wurde eine Erhöhung des Ankopplungswiderstandes um den Faktor 2 bis 3 erwartet.

Um die Stingerzementation der Elektroden 13, 14 und 15 im Bohrlochringraum der Bohrung Ktzi200 zu überwachen, wurden kontinuierliche elektrische Ankopplungsmessungen durchgeführt. Es sollte der Ankopplungswiderstand zwischen den beiden Elektroden 1 und 15 kontinuierlich während der Zementation gemessen werden. Mit steigender Zementsäule im Ringraum sollten auch die Ankopplungswiderstände zwischen den Elektroden 1 und 14 bzw. 13 erfasst werden.

Der Zement wurde in einem Zementationsstrang im Inneren der Verrohrung bis zum unteren Bohrlochrand (Bohrschuh) gepumpt (Ankunft dort zum Zeitpunkt 0 min). Ab dem Aufstiegsbeginn des Zementes vom Rohrschuh nach oben in den Bohrlochringraum wurde der Ankopplungswiderstand knapp 4 min lang gemessen. Die Aufstiegs geschwindigkeit des Zementes wurde mit etwa 25 m/ min angenommen. Bei einer Steighöhe von rund 75 m vom Bohrschuh nach oben zur Elektrode 15 entspricht dies einer Steigzeit von rund 3 min. Nach insgesamt rund 4 min war zu erwarten, dass auch die Elektrode 13 im Zement steht und die Ankopplungsmessung zwischen Elektrode 1 und 15 beendet werden kann. Zur Kontrolle des weiteren Zementaufstiegs sollte daher nach 4 min Messzeit der Übergangswiderstand zwischen den Elektroden 1 und 13 kontinuierlich erfasst werden (Abb. 4.9).

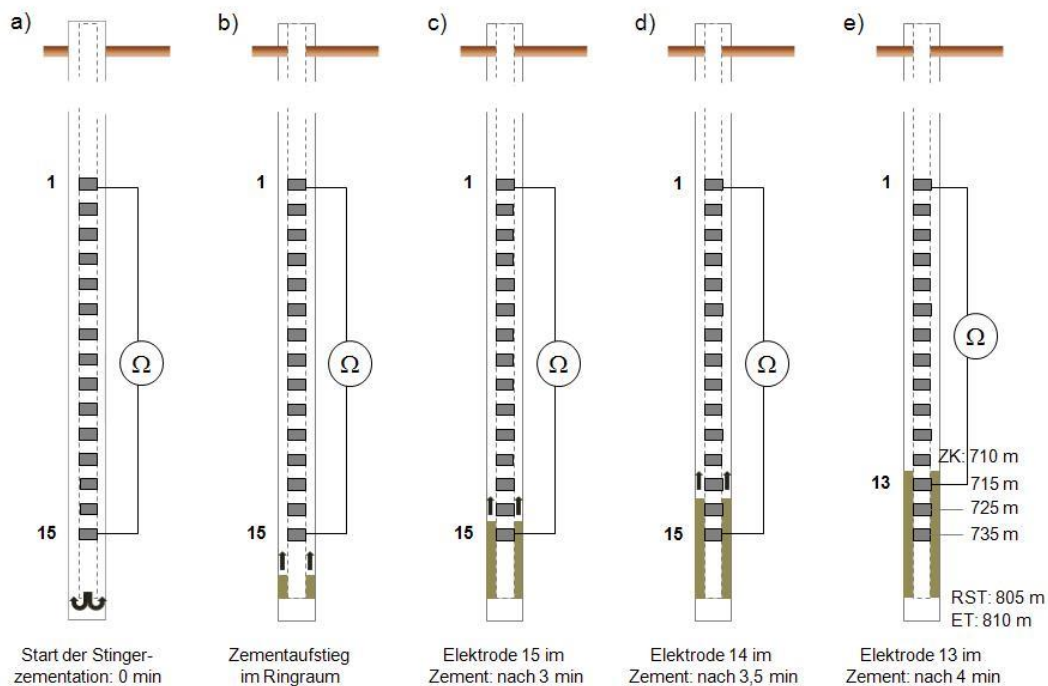


Abb. 4.9: Prinzipskizze der geplanten Zementationsüberwachung in Phase I. Stingerzementation im unteren Bohrlochbereich in der Bohrung Ktzi200 (Endteufe, ET, von 810 m (u GOK)): a) bis d) Messung des elektrischen Ankopplungswiderstandes zwischen Elektrode 1 und 15 vom Beginn des Zementaufstiegs (Rohrschuhteufe, RST, von 805 m (u GOK)) kontinuierlich 4 min lang. e) Messung des Ankopplungswiderstandes zwischen Elektrode 1 und 13. Der Zementkopf (ZK) der Stingerzementation (Zementationshöhe) war für 710 m (u GOK) geplant.

4.2.4.2 Ergebnisse

In Abbildung 4.10 sind die Ankopplungswiderstände während der Stingerzementation (unterer Bohrlochbereich, 805 m bis 710 m (u GOK)) am 07.05.2007 gegen den Messfortschritt aufgetragen. Messung 1 bis 147 zeigt den zeitlichen Verlauf des Ankopplungswiderstandes zwischen den beiden Elektroden 1 und 15 während der Stingerzementation. Da keine signifikante Erhöhung des elektrischen Ankopplungswiderstandes auftrat, wurde die Messzeit auf 5,8 min nach Zementaufstiegsbeginn im Ringraum verlängert. Danach erfolgte die Messung zwischen den beiden Elektroden 1 und 14 (Messung 148 bis 155, Messzeit von rund 5,8 bis 6,1 min). Anschließend wurde der Ankopplungswiderstand zwischen der Elektrode 1 und 13 gemessen (Messung 156 bis 199, Messzeit von rund 6,1 bis 7,8 min).

Die Ankopplungswiderstände folgen, über dem Messfortschritt dargestellt, einer Sinusfunktion mit einer Frequenz von rund 9,5 mHz und elektrischen Widerstandswerten

von 126 bis 139 Ω (Abb. 4.10). Auch Ankopplungsmessungen 90 bis 45 min vor dem Zementationsbeginn zeigen ähnliche Kurvenverläufe mit Frequenzen von 0,0067 bis 0,0137 Hz und ähnliche Ankopplungswiderstände von rund 128 bis 135 Ω . Somit konnten während der Stingerzementation im unteren Bohrlochbereich leider keine Änderungen im elektrischen Widerstand beobachtet werden.

4.2.4.3 Interpretation und Diskussion

Die elektrischen Ankopplungswiderstände lagen vor und während der Zementation unverändert im einstelligen Ohmbereich. Da die Zementation störungsfrei ablief, wurde geschlussfolgert, dass der Zementationsprozess mit den durchgeführten elektrischen Ankopplungsmessungen nicht nachgewiesen werden konnte. Aus zeitlichen Gründen musste auf die Überwachung der Stopfzementation im oberen Bohrlochbereich der Bohrung Ktzi200 verzichtet werden.

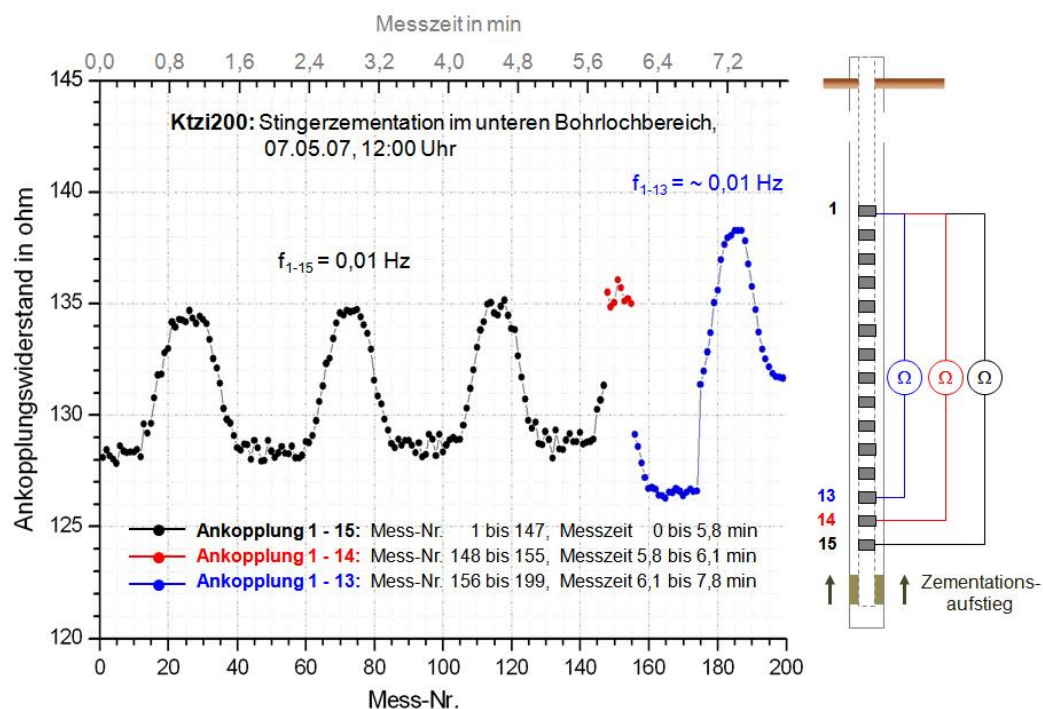


Abb. 4.10: Zeitlicher Verlauf der elektrischen Ankopplungswiderstände während der Stingerzementation im unteren Bohrlochbereich in der Bohrung Ktzi200 zwischen den Elektroden 1 und 15 (schwarz), zwischen den Elektroden 1 und 14 (rot) sowie zwischen den Elektroden 1 und 13 (blau). Die Prinzipskizze der Messung ist rechts dargestellt.

Im Verlauf weiterer Untersuchungen der Kollegen vor Ort mittels Zementationsbohrloch- (CBL) und Temperaturmessungen (DTS), stellte sich heraus, dass trotz der planmäßig verlaufenden Zementation, der Zement eine geringere Zementationshöhe erreichte (Henninges & Brandt, 2007). Diese Messungen ergaben einen Zementkopf bei einer Tiefe von 20 m unterhalb der untersten Elektrode bei rund 755 m (u GOK). Folglich wurde keine der Elektroden während der Stingerzementation im Ringraum zementiert. Der elektrische Ankopplungswiderstand blieb somit unverändert im einstelligen Ohmbereich.

Die sinusförmigen Schwankungen der Ankopplungswiderstände mit der Zeit vor und nach der Zementation ließen sich nur durch externe Einflüsse erklären. Vermutlich wurde die Störung durch die Interferenz mit anderen Frequenzen verursacht. Das Messgerät wurde mit einem externen Akku betrieben. Interferenzen mit der Netzfrequenz wurden ausgeschlossen. Da das Messgerät weder über eine Heizung noch über einen Lüfter verfügte, konnten interne Temperaturnausgleichsvorgänge ebenfalls ausgeschlossen werden. Für die zeitlich später stattfindenden Messungen zur Überwachung der CO₂-Injektion befanden sich die Messgeräte in einem klimatisierten Labormesscontainer.

4.2.5 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse von Phase I

In den Bohrungen Ktzi200, Ktzi201 und Ktzi202 wurde anhand von elektrischen Isolationsmessungen zwischen der installierten Elektrode über Tage und dem Bohrtisch nach dem Anklemmen jeder einzelnen Elektrode auf die isolierte Verrohrung überprüft, ob die elektrisch isolierte Außenbeschichtung der Edelstahlrohre intakt geblieben war. Die Messungen lieferten Ankopplungswiderstände im Megaohm-Bereich. Sie bestätigten eine unbeschädigte Isolierung der Außenbeschichtung der Edelstahlrohre. Eine intakte Isolierung bedeutete ein funktionsfähiges Punkt-Elektrodensystem, was für die Durchführung der geoelektrischen Messungen Voraussetzung war.

In den Bohrungen Ktzi200, Ktzi201 und Ktzi202 wurde anhand von elektrischen Ankopplungsmessungen zwischen benachbarten Elektroden unter Tage überprüft, ob jeweils die Verbindung zwischen installierter Elektrode und dem Messkabel während des gesamten Einbaus intakt geblieben war. Die Messungen lieferten Ankopplungswiderstände im einstelligen Ohmbereich. Sie bestätigten eine elektrische Verbindung und damit den erfolgreichen Anschluss aller Elektroden an das jeweilige Messkabel. Durchgeführte Reflexionsmessungen zur Bestimmung der Kabellänge bestätigten die Ergebnisse der elektrischen Ankopplungsmessungen. Sie brachten ebenfalls keinen Hinweis auf ein durchtrenntes Messkabel und damit auf eine

Kabelbeschädigung während des Einbaus. Kabelmantelbeschädigungen und damit verbundenes Eindringen von Formationsfluiden ins Kabelinnere konnte weder mithilfe elektrischer Ankopplungs-messungen noch mit Reflexionsmessungen ausgeschlossen werden.

Zur Beurteilung der geoelektrischen Messwerte spielt die elektrische Ankopplung der Elektroden an den geologischen Untergrund eine entscheidende Rolle. Aus diesem Grund wurde der Zementationsprozess zeitlich überwacht. Es sollte die Zementationshöhe im Bohrlochringraum und die damit verbundene Zementation bestimmter Bohrlochelektroden kontrolliert werden. Da generell alle Filterbereiche (für die CO₂-Injektion ins Reservoir) unzementiert bleiben sollten, durften die Bohrungen nur teilzementiert werden. Die Stingerzementation der unteren Bohrlochelektroden in der Bohrung Ktzi200 sollte mithilfe der kontinuierlichen Messung des elektrischen Ankopplungswiderstandes zwischen nichtzementierter und zementierter Elektrode mit fortschreitendem Zementanstieg im Bohrlochringraum von unten nach oben überwacht werden. Die Messungen brachten keine Änderungen im elektrischen Ankopplungswiderstand im Vergleich zu Messungen vor dem Zementationsbeginn. Die elektrischen Ankopplungswiderstände lagen vor und während der Zementation unverändert im einstelligen Ohmbereich. Sie lassen darauf schließen, dass keine der geplanten unteren Elektroden während der Stingerzementation zementiert wurde. Zementationsbohrloch- und Temperaturmessungen bestätigen zu einem späteren Zeitpunkt die geringere Zementationshöhe und damit eine Nichtzementierung der unteren Bohrlochelektroden in der Bohrung Ktzi200.

Anhand der geoelektrischen Überwachung während der Phase I der Installation, des Einbaus und der Zementation, wurde bestätigt, dass alle Elektroden erfolgreich installiert, ins Bohrloch eingebaut und voll funktionstüchtig waren (Kießling *et al.*, 2008; Kießling *et al.*, 2009). Es wurden elektrische Ankopplungsmessungen zur Überwachung der Installationsphase angewandt, die keinen Standard darstellten und im Rahmen dieser Arbeit für diese Problemstellung entwickelt und angepasst wurden. Die durchgeführten Kontrollmessungen konnten ohne Behinderung oder Verzögerung des Installationsbetriebs in dem dargestellten Umfang erfolgreich realisiert werden. Erstmals konnten permanente Bohrlochelektroden im tiefen Untergrund zur Überwachung der CO₂-Speicherung installiert werden.

4.3 CO₂-Injektion

Am Pilotstandort Ketzin stand die interdisziplinäre Forschung zur CO₂-Injektion, CO₂-Speicherung und deren Überwachung im Vordergrund. Im Gegensatz zu industriellen Speicherprojekten, kam es nicht auf eine möglichst hohe verpresste Gesamtspeichermenge an. Es wurde eine CO₂-Menge von insgesamt 67.000 t CO₂ injiziert (Bergmann *et al.*, 2014; Szizybalski *et al.*, 2014). Sie ist für wissenschaftliche Untersuchungen des Speicherverhaltens völlig ausreichend. Des Weiteren ist die CO₂-Speicherung in Deutschland gesetzlich ohnehin auf eine maximale Gesamtspeichermenge von 4 Mill t CO₂ begrenzt (Kohlendioxid-Speicherungsgesetz, KSpG, 2012).

Im Weiteren werden die Vorinjektionsmaßnahmen und der CO₂-Injektionsverlauf selbst beschrieben und in einzelne zeitliche Abschnitte gegliedert, sowie die technische Umsetzung des Injektionsprozesses erläutert.

4.3.1 Vorinjektionsmaßnahmen und CO₂-Injektionsverlauf

Während die **Phase I** den Prozess der Installation, des Einbaus und der Zementation der Bohrlochelektroden beschrieb, wurde der CO₂-Injektionsprozess selbst in drei weitere Phasen gegliedert:

- Phase II: vor dem Start der CO₂-Injektion (bis 29.06.2008)
- Phase III: während der CO₂-Injektion (30.06.2008 bis 29.08.2013)
- Phase IV: nach der regulären CO₂-Injektion.

In **Phase II** wurde vor der CO₂-Testinjektion am 20.06.08 (12 Uhr) zur Injektivitätssteigerung Stickstoff (N₂) vorgespannt (Stickstoff-Lift). Danach wurde ein KCl-Slug durchgeführt, bei dem eine 6 %ige Kaliumchlorid-Lösung ebenfalls als Präventionsmaßnahme injiziert wurde, um eine mögliche CO₂-induzierte Salzausfällung durch auftretende Trocknungseffekte zu vermeiden. Anschließend wurde ein Krypton-Tracer (Kr) zur chemischen Markierung injiziert (siehe Abb. 3.10a, Kap. 3.3.6). Bei der CO₂-Testinjektion wurde lediglich eine Kleinstmenge von rund 30 l CO₂ (entspricht rund 0,035 t bzw. rund 18 m³ CO₂) verpresst. Danach wurde erneut ein Stickstoff-Lift durchgeführt (Zimmer *et al.*, 2011b), bevor am 24.06.08 (10 Uhr) die CO₂-Injektion mit vorerst geringer CO₂-Injektionsrate begann. Die Volumenangaben beziehen sich hierbei auf Normalbedingungen.

Die Phase II umfasst somit folgende Vorinjektionsmaßnahmen, eine CO₂-Testinjektion und die CO₂-Injektion mit geringer Rate (durchschnittlich 0,8 t/h):

- N₂-Injektion: 27.02. - 28.02.08 und 16.06. - 17.06.08: 42 m³ N₂
- KCL-Slug: 17.06. - 20.06.08: 30 m³ KCL
- Kr- und N₂-Injektion: 20.06.08: 6,25 m³ Kr und N₂
- **CO₂-Testinjektion:** 20.06.2008 (12 Uhr): 18 m³ CO₂
- N₂-Injektion: 20.06. - 24.06.08: 128 m³ N₂
- **CO₂-Injektion mit geringer Rate:** 24.06.2008 (10 Uhr) bis 29.06.2008.

Die **Phase III** beschreibt die **CO₂-Injektion mit erhöhter Rate** (durchschnittlich rund 2,0 t/h). Die geoelektrischen Messungen für diese Arbeit fanden von 05/2007 bis 05/2009 statt. Die geoelektrische Überwachung der CO₂-Injektion nach dem 13.05.09 in Phase III, sowie die Phase IV werden in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

4.3.2 Technische Umsetzung der CO₂-Injektion

Seit 06/2008 wurde CO₂ täglich mit Tanklastern zum Forschungsspeicher Ketzin geliefert, dort in zwei überirdischen Vorrattanks zwischengelagert, um es dann in der Injektionsbohrung Ktzi201 in einer Tiefe von rund 630 m zu verpressen. Die CO₂-Injektionsanlage bestand aus zwei überirdischen Tankanlagen mit insgesamt 100 t Fassungsvermögen, fünf Druckpumpen und einer Heizanlage (Schilling *et al.*, 2009). Das Gesamtfassungsvermögen der beiden Tankanlagen lag damit deutlich über der injizierten Tagesgesamtmenge von bis zu 78 t CO₂. Das CO₂ hatte zur Zwischenspeicherung in den beiden Tankanlagen einen Druck von etwa 21 bar und eine Temperatur von etwa -18 °C (Martens *et al.*, 2015a). Das CO₂ war somit flüssig.

Am Bohrlochkopf der Injektionsbohrung wurde das Speichergas auf etwa 35 °C erwärmt und auf einen Druck von etwa 62 bar verdichtet (vorgespannt), bevor das gasförmige CO₂ in den Untergrund injiziert wurde (Möller *et al.*, 2012). Die Injektionsanlage wurde für Injektionsraten von 0 bis 3.250 kg CO₂/ h konzipiert und an die wissenschaftlichen Aufgaben und Anforderungen angepasst (Liebscher *et al.*, 2012).

Im Mai 2009, dem Ende des für diese Arbeit relevanten Messzeitraumes, waren bereits rund 14.700 t CO₂ (Würdemann *et al.*, 2010) injiziert. Zur Injektion wurde ausschließlich Kohlenstoffdioxid der Firma Linde AG (Reinheitsgrad von 99,9 %, entspricht Lebensmittelqualität) verwendet.

Während der CO₂-Injektion wurden zahlreiche kurze Injektionspausen (engl.: *shut-ins*), bei denen die CO₂-Injektionsrate 0 t/ h betrug, durchgeführt. Die Injektionspausen waren entweder technisch bedingt oder für die seismischen Messungen im Bohrloch

notwendig. Sie führten zu sehr unbeständigen Reservoirbedingungen mit schwankenden Drücken und Temperaturen.

Die Formationstemperatur in der Injektionstiefe von rund 650 m betrug etwa 35 °C (Würdemann *et al.*, 2010). Aus technischen Gründen wurde der Drucksensor in 550 m Tiefe installiert. Der gemessene Druck stieg von anfänglichen 60,4 bar nach dem Beginn der CO₂-Injektion im 06/2008 auf ein Maximum von 76 bar an, schwankte und stabilisierte sich erst bis zum Frühjahr 2010 (74 bis 76 bar). Für den Reservoirdruck (630 m) ergab sich ein um rund 2 bar größerer Druck als der, der in 550 m gemessen wurde (Martens *et al.*, 2012; Liebscher *et al.*, 2013). Bei den Umgebungs-eigenschaften, die in 630 m Tiefe herrschten (35 °C, ab 74 bar), lag das CO₂ als superkritisches Fluid vor. Bei geringerem Druck wäre das CO₂ gasförmig.

Abbildung 4.11 zeigt die CO₂-Injektionsmengen und den gemessenen Druck in 550 m Tiefe in der Injektionsbohrung Ktzi201 der Phase III für den Zeitraum der Messungen.

Nach injizierten 67.271 t CO₂ (Bergmann *et al.*, 2014; Szizybalski *et al.*, 2014) endete im 08/2013 regulär der CO₂-Injektionsbetrieb an der Pilotanlage Ketzin.

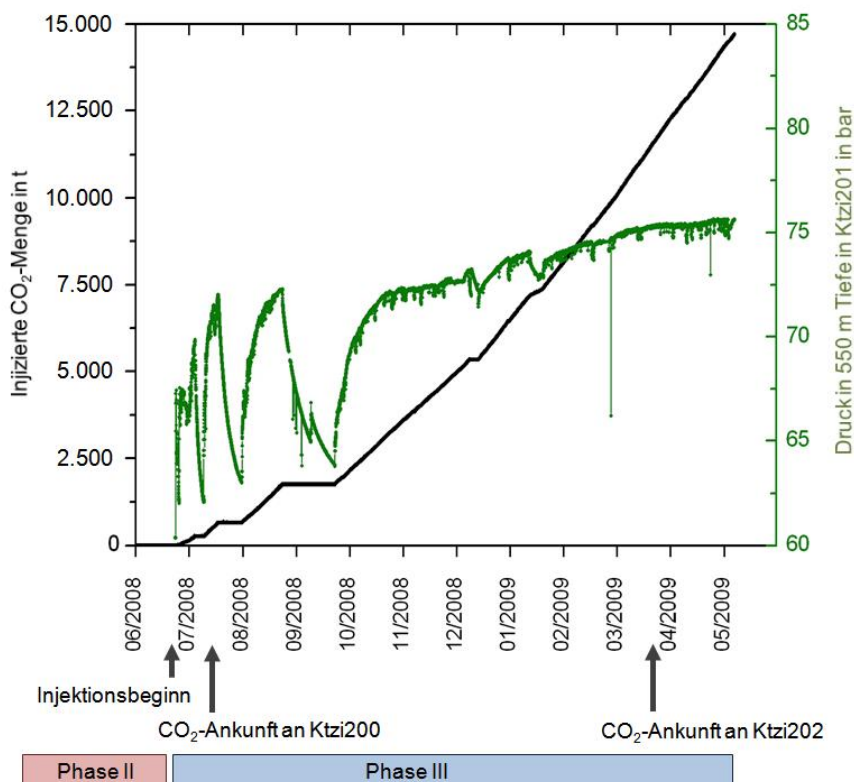


Abb. 4.11: Darstellung der CO₂-Injektionsmenge (in t) und des Druckes (in bar) in 550 m Tiefe in der Injektionsbohrung Ktzi201 für die Phase III der geoelektrischen Messungen im Bohrloch (Daten nach Möller *et al.*, 2012; Martens *et al.*, 2012).

4.4 Phase II: Geoelektrische Messungen im Bohrloch vor dem Start der CO₂-Injektion

Im Rahmen dieser Dissertation wurden vor dem Start der CO₂-Injektion elektrische Ankopplungsmessungen und geoelektrische Messungen im Bohrloch mit der Geoelektrikapparatur GeoTom durchgeführt und ausgewertet, um die CO₂-Speicherung in Ketzin geoelektrisch vor dem Start der CO₂-Injektion zu überwachen. Diese Messungen fanden ein- bzw. achtkanalig statt. Die Arbeitsfrequenz des eingespeisten Stromsignals betrug $f = 4,16$ Hz. Somit wurden niederfrequente Wechselströme zur Vermeidung von störenden Polarisierungseffekten genutzt. Das Messgerät gab zu jeder Einzelmessung die diskreten Werte von eingespeistem Strom I , der gemessenen Potentialdifferenz U , sowie der Standardabweichung (Maß für die Streuung der Messwerte) aus. Die Messwerte wurden jeweils aus vier Vergleichswerten geräteintern gemittelt und ausgegeben. Die Stromzeitreihen $I(t)$ und Spannungszeitreihen $U(t)$ wurden dabei nicht gespeichert. Eine Datenvorbereitung, wie beispielsweise die Stapelung einzelner Messzeitreihen zur Verbesserung der Signalqualität, war daher nicht möglich. Die geoelektrischen Messergebnisse, die mit der Apparatur GDP-32 aufgrund technischer Probleme erst unmittelbar nach der CO₂-Testinjektion am 20.06.08 gewonnen wurden, sind ausschließlich in Kießling *et al.* (2010b) beschrieben und nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Es wurden die Vorinjektionsmaßnahmen, die CO₂-Testinjektion und die CO₂-Injektion mit geringer Rate (Phase II, bis 29.06.08) mit folgenden Messungen kontrolliert:

- zeitliche Überwachung der elektrischen Ankopplung der Bohrlochelektroden in den Bohrungen Ktzi200, Ktzi201 und Ktzi202 (Kap. 4.4.1)
- zeitliche Überwachung spezieller Elektrodenanordnungen in jeweils einer Bohrung (Kap. 4.4.2) und
- geoelektrische Messungen in den Bohrungen Ktzi200, Ktzi201 und Ktzi202 (Kap. 4.4.3).

Insbesondere die Ergebnisse der elektrischen Ankopplungsmessungen vor der CO₂-Injektion waren von großer Bedeutung. Zeigten sie zeitlich stabile Messwerte, so ließen sich gemessene Widerstandsänderungen mit Beginn der CO₂-(Test)Injektion zweifellos der CO₂-Speicherung zuordnen. Die geoelektrischen Messungen im Bohrloch sollten den Speicherhorizont hinsichtlich seiner Widerstandsverteilung beschreiben und seine Änderung während der Phase II aufgrund der Vorinjektionsmaßnahmen, der CO₂-Testinjektion und der CO₂-Injektion mit geringer Rate belegen. Die vor dem Start der

CO₂-Injektion durchgeführten elektrischen Ankopplungsmessungen und geoelektrischen Messungen in einer bzw. in mehreren Bohrungen werden im Folgenden als Nullmessungen bezeichnet. Eine Bewertung der geoelektrischen Ergebnisse wurde mithilfe eines Vergleichs der Ergebnisse der CO₂-Sättigungsbestimmungen mit dem Puls-Neutron-Gamma-Verfahren, der Ergebnisse der Widerstands-Bohrlochmessungen und der Langzeit-Durchströmungsexperimente im Labor unter in-situ Bedingungen vorgenommen.

4.4.1 Zeitliche Überwachung der elektrischen Ankopplung der Bohrlochelektroden in Ktzi200, Ktzi201 und Ktzi202

4.4.1.1 Versuchsaufbau und Datenakquisition

Um die zeitliche Variabilität der Ankopplungswiderstände an den Bohrlochelektroden ohne CO₂-Einfluss und damit ihre Vertrauenswürdigkeit zu untersuchen und zu beurteilen, wurden elektrische Ankopplungsmessungen vom Zeitpunkt des Elektrodeneinbaus an bis zum Beginn der CO₂-Injektion im 06/2008 und darüber hinaus durchgeführt.

Die elektrischen Ankopplungsmessungen in Phase II sollten neben der Überprüfung der Stabilität der Messwerte auch folgende Injektionsmaßnahmen überwachen:

- die CO₂-Testinjektion von 30 l CO₂ am 20.06.2008 im bohrlochnahen Bereich der Injektionsbohrung Ktzi201 und
- den Injektionsprozess mit geringer Rate (ab 24.06.2008) in der Injektionsbohrung Ktzi201.

Bei den elektrischen Ankopplungsmessungen wurde der Übergangswiderstand (Ankopplungswiderstand) zwischen jeweils zwei benachbarten Elektroden bestimmt, indem zwischen zwei Elektroden ein elektrischer Strom injiziert und dann der elektrische Spannungsabfall gemessen wurde. Es fanden 63 Einzelmessungen statt. Die genauen Daten (Datum, Uhrzeit, Vorinjektionsmaßnahmen, CO₂-Injektionstest, CO₂-Injektion mit geringer Rate) der Einzelmessungen sind für die Injektionsbohrung Ktzi201 in Tabelle A.2 aufgelistet.

4.4.1.2 Ergebnisse

Die **elektrischen Ankopplungsmessungen** in Phase II fanden im Zeitraum vom 29.05.07 (nach dem Einbau der Elektroden 1 bis 15 in die Bohrung Ktzi200 am 06.05.07)

bis 29.06.08 statt. Der zeitliche Verlauf der Messwerte aus den Einzelmessungen in den Bohrungen Ktzi200, Ktzi201 und Ktzi202 ist in Abbildung 4.12 farbcodiert dargestellt. Für die ersten Messungen lagen nur Daten zur Bohrung Ktzi200 vor, erst mit dem zeitlich späteren Einbau der Elektroden in die Bohrungen Ktzi201 und Ktzi202 konnten dann auch elektrische Ankopplungswiderstände in diesen beiden Bohrungen gemessen werden. Gleiche Nummern der Einzelmessungen bedeuten somit Ankopplungsmessungen an gleichen Messtagen. Nach der permanenten Installation aller Bohrlochelektroden in den drei Bohrungen wurden ab dem 22.02.08 (Messung Nr. 22) während jeder Einzelmessung Ankopplungsmessungen für alle 45 Elektroden durchgeführt.

Die gemessenen Werte schwankten zwischen rund 50 Ω und 200 Ω (Abb. 4.12). Ab Ende 09/2007 (ab Messung Nr. 13) sanken die Widerstände in allen drei Bohrungen von durchschnittlich rund 150 Ω auf durchschnittlich rund 75 Ω . Ab Mitte 02/2008 (ab Messung Nr. 22) wurden in den Beobachtungsbohrungen zwischen den Elektroden 10 - 11, 11 - 12 (Ktzi200) und 38 - 39, 39 - 40 (Ktzi202) geringere Werte von rund 55 Ω gemessen.

In der Injektionsbohrung Ktzi201 wurden nach dem Beginn des CO₂-Injektionstests am 20.06.08 (12 Uhr, 30 l CO₂) ab der Messung Nr. 38 (20.06.08, 14 Uhr) erhöhte Widerstände (90 bis 135 Ω) zwischen den Elektroden 17 -18, 18 - 19 und ab Messung Nr. 39 (20.06.08, 17 Uhr) zusätzlich zwischen den Elektroden 19 - 20 gemessen. Die Ankopplungswiderstände der Elektroden (ab Messung 13), die weder durch mangelnde Funktionstüchtigkeit noch durch erhöhte Ankopplungswiderstände aufgrund der CO₂-(Test)injektion auffielen, lagen im Mittel bei rund 80 Ω und schwankten zwischen 5 und 15 %. Vereinzelt traten in den beiden Beobachtungsbohrungen abweichende Ankopplungswiderstände (beispielsweise Messung Nr. 44, 21.06.08, 00:31 Uhr) auf.

Die Ergebnisse während der CO₂-Testinjektion (20.06.08) und der anschließenden CO₂-Injektion mit geringer Rate (ab 24.06.08) sind anhand von fünf Beispielmesskurven (Einzelmessungen) in Abbildung 4.13 detaillierter dargestellt. Die Ergebnisse der fünf Beispielmesskurven zeigen alle tendenziell ähnliche Ankopplungswiderstände in allen drei Bohrungen. Es weichen lediglich die Messwerte an den Elektroden 11 (Ktzi200), 18 bis 21 (Ktzi201) und 39 bis 45 (Ktzi202) von diesen durchschnittlichen Messwerten ab. In allen Bohrungen ist die Tiefenabhängigkeit der Widerstandswerte auffällig. Mit zunehmender Bohrlochtiefe (steigender Elektrodennummer) wurde jeweils ein höherer Ankopplungswiderstand gemessen.

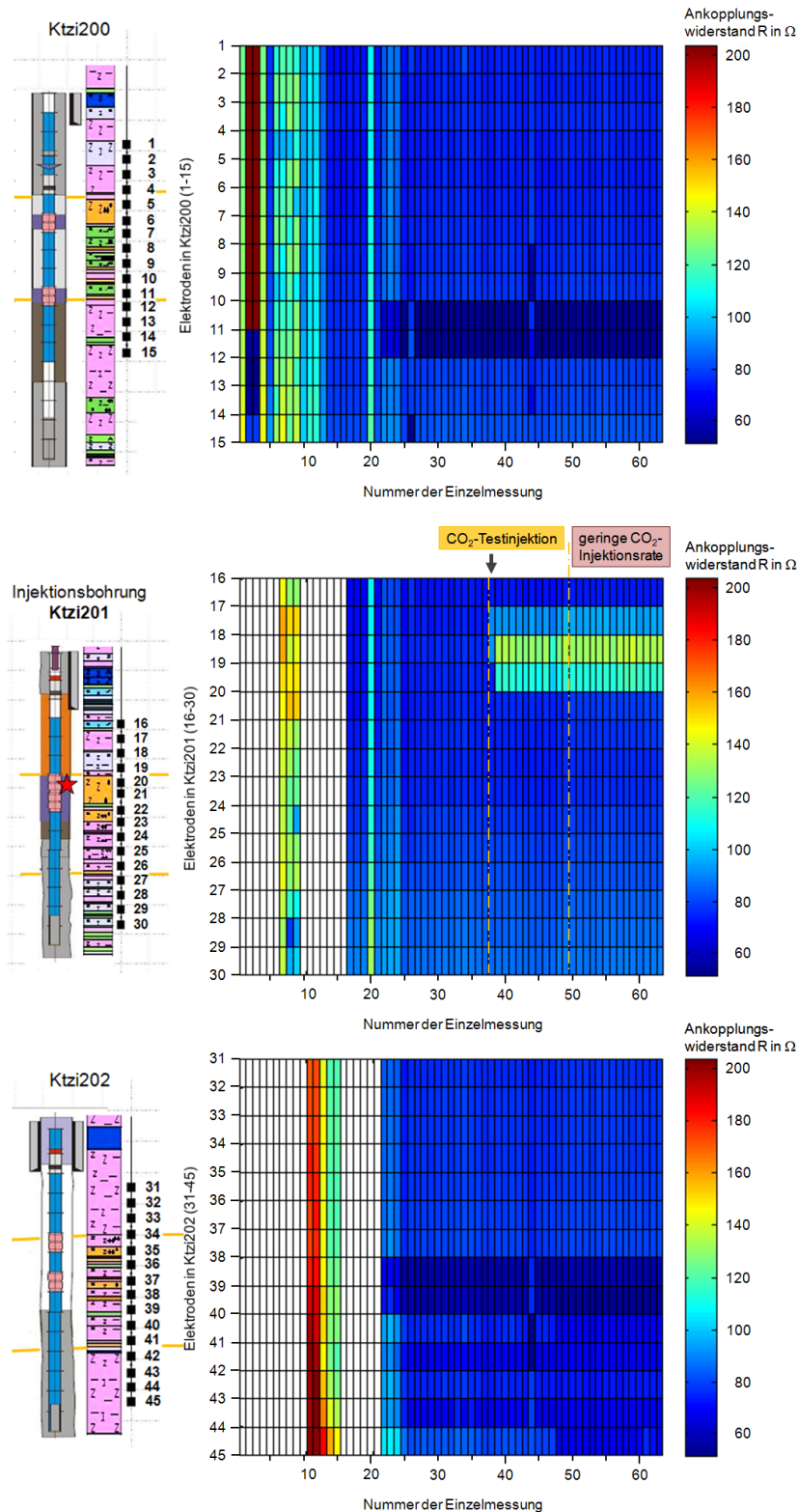


Abb. 4.12: Farbcodierte Darstellung der gemessenen Ankopplungswiderstände zwischen den jeweils benachbarten Elektroden in der Injektionsbohrung Ktzi201 (mitte) und den beiden Beobachtungsbohrungen Ktzi200 (oben) und Ktzi202 (unten) im Zeitraum vom 29.05.07 (Messung Nr. 1) bis 29.06.08 (Messung Nr. 63) in der Phase II. Links neben den Diagrammen ist die Anordnung der Vertikalelektroden mit den Zementationsbereichen und der Lithologie der jeweiligen Bohrung dargestellt (nach Abb. 4.8, Kap. 4.2.4.1). Der rote Stern markiert den Ort der CO₂-Injektion in der Bohrung Ktzi201.

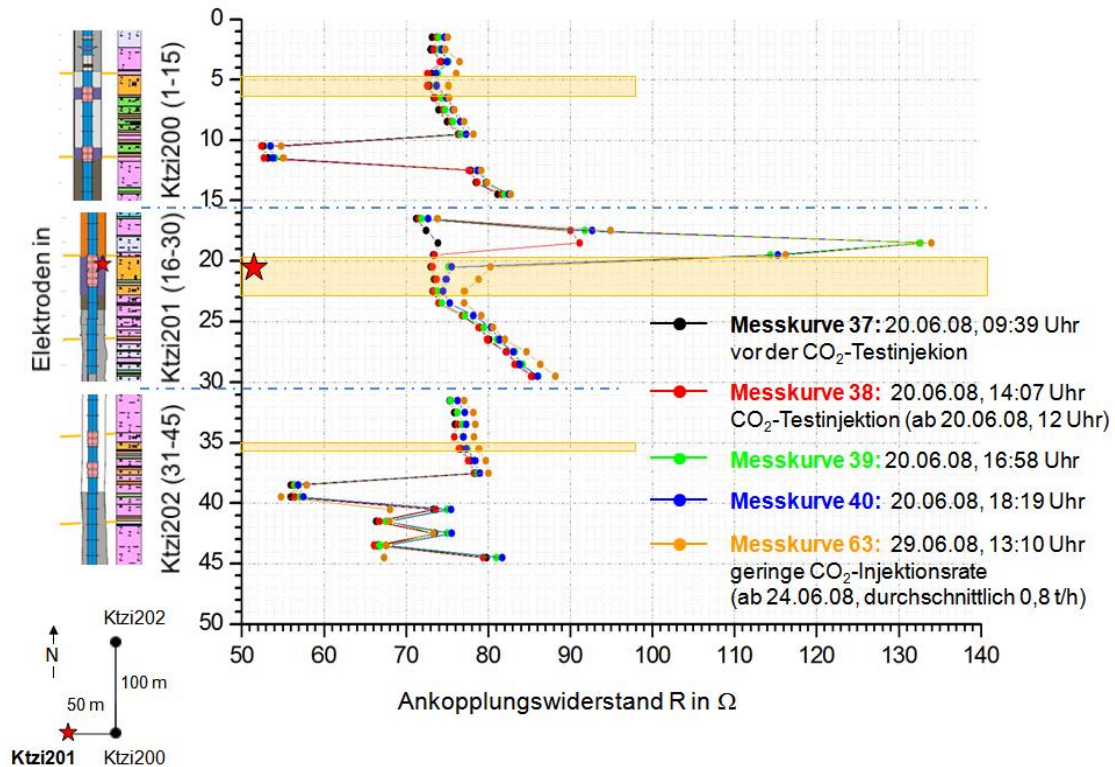


Abb. 4.13: Darstellung der gemessenen Ankopplungswiderstände zwischen den jeweils benachbarten Elektroden in allen drei Bohrungen für die Beispielmesskurven 37 - 40 und 63. Während die Messung 37 (schwarz) zeitlich kurz vor dem Beginn der CO₂-Testinjektion (20.06.08, 12 Uhr) stattfand, wurden die Messkurven 38 (rot), 39 (grün) und 40 (blau) direkt nach der CO₂-Testinjektion aufgenommen. Die Messung 63 (orange) wurde während der CO₂-Injektion mit geringer Rate aufgenommen. Die Tiefenlage des Sandsteinreservoirs ist gelb hinterlegt und der rote Stern markiert den Ort der CO₂-Injektion in der Bohrung Ktzi201.

Messung Nr. 37 wurde zeitlich kurz vor dem Beginn der CO₂-Testinjektion (20.06.08, 12 Uhr) durchgeführt. Es wurden Ankopplungswiderstände von rund 73 - 85 Ω aufgenommen, während bei den Messungen 38, 39 und 40 nach Beginn des CO₂-Injektionstests in der Injektionsbohrung Ktzi201 im Vergleich zur Messung Nr. 37 erhöhte Widerstände im Tiefenbereich der CO₂-Injektion (an den Elektroden 18, 19 und 20) gemessen wurden. Erhöhte Werte im Bereich der Injektion in Ktzi201 sind auch weiterhin in der Messkurve 63 (nach Beginn der CO₂-Injektion mit geringer Rate ab 24.06.08) erkennbar. Es wurden zwischen den Elektroden 10 - 11, 11 - 12 (Ktzi200) und 38 - 39, 39 - 40 (Ktzi202) in allen fünf Beispielmessungen geringere Werte (rund 52 - 58 Ω) gemessen. Die Messungen zwischen den Elektroden 41 - 42 und 43 - 44 (Ktzi202) zeigten verringerte Werte von rund 65 Ω (Messung 37 - 40). In der Messkurve 63 wurden zusätzlich zwischen den Elektroden 40 - 41 und 44 - 45 geringere Werte (rund 68 Ω) gemessen.

4.4.1.3 Interpretation und Diskussion

Bei den **elektrischen Ankopplungsmessungen** sanken die Werte in Abbildung 4.12 von durchschnittlich rund $150\ \Omega$ (bis Messung Nr. 12, Anfang 09/2007) auf durchschnittlich rund $75\ \Omega$ (ab Messung Nr. 13, Ende 09/2007) ab. Das ließ eine Salinitätsänderung im bohrlochnahen Raum vermuten. Zurückströmendes Formationswasser diffundierte in die Bohrlochspülung geringerer Salinität. Der Ankopplungswiderstand nahm somit ab.

Nachdem sich das komplexe System im Reservoir stabilisierte hatte, stabilisierten sich auch die gemessenen elektrischen Ankopplungswiderstände an den Bohrlochelektroden. Somit zeigten die Ankopplungsmessungen im weiteren Verlauf der Phase II zeitlich stabile Messwerte. Mit dem Beginn der CO_2 -(Test)Injektion ließen sich die gemessenen Widerstandsänderungen somit zweifellos der CO_2 -Speicherung zuordnen.

Die sehr niedrigen Ankopplungswiderstände an den Elektroden 11 (Ktzi200) und 39 (Ktzi202) ab der Messung Nr. 22 (02/2008) entsprachen den Werten des Kabelwiderstandes. Es lag eine Kurzschlussmessung vor. Die langfristige Funktionsfähigkeit der Bohrlochelektroden wird in Kapitel 4.7 ausführlich betrachtet und bewertet.

Die erhöhten Messwerte (90 bis $135\ \Omega$) in der Injektionsbohrung Ktzi201 ab der Messung Nr. 38/ 39 (20.06.08) an der Elektrode 18 und 19 ließen sich auf die CO_2 -Testinjektion zurückführen. Das in der Tiefe der Elektroden 20 - 21 injizierte elektrisch nichtleitende CO_2 verursachte eine schlechtere Ankopplung und somit eine Erhöhung der Widerstände. Aufgrund der unzementierten Bereiche oberhalb des Injektionspunktes in der Bohrung Ktzi201 (siehe Abb. 4.8, Kap. 4.2.4.1) war ein CO_2 -Aufstieg im Ringraum der Bohrung bis zur Elektrode 18 überhaupt möglich. Die PNG-Daten (CO_2 -Sättigungsbestimmungen mit dem Puls-Neutron-Gamma-Verfahren) belegen, dass CO_2 in den unzementierten Bereich oberhalb des Reservoirs eingedrungen war (Bergmann *et al.*, 2012).

Vom 24.06.08 bis zum 29.06.08 (Messung Nr. 50 bis 63) wurde die CO_2 -Injektion mit geringer Rate (durchschnittlich $0,8\ \text{t/h}$) durchgeführt und verursachte analog zur CO_2 -Testinjektion erhöhte Ankopplungswiderstände im Tiefenbereich der CO_2 -Injektion. Zwischen der 38. (20.06.08, Testinjektion) und 49. Messung (23.06.08, vor CO_2 -Injektion mit geringer Rate) blieb der Widerstand konstant erhöht, ohne sich sichtbar wieder abzusenken. Konstant erhöhte Werte waren auf die Injektion des elektrisch

nichtleitenden Stickstoffes zurückzuführen. Die N₂-Injektion fand zeitlich zwischen der CO₂-Testinjektion und dem Beginn der CO₂-Injektion mit geringer Rate statt (Kap. 4.3.1). Zwischen den einzelnen Gasen konnte weder mittels geoelektrischer Messungen noch mittels elektrischer Ankopplungsmessungen unterschieden werden.

In Abbildung 4.13 zeigen die Beispielmesskurven der elektrischen Ankopplungsmessungen Nr. 38, 39, 40 und 63 im Gegensatz zur Beispielmessung Nr. 37 (vor dem Injektionsbeginn) in der Injektionsbohrung Ktzi201 an den Elektroden 18 bis 21 Erhöhungen im Ankopplungswiderstand. Sie wurden von der CO₂-Testinjektion (20.06.08, 12 Uhr) und der anschließenden CO₂-Injektion mit geringer Rate (ab 24.06.08) verursacht.

Die tendenziell ähnlichen Ankopplungswiderstände in den Bohrungen Ktzi200, Ktzi201 und Ktzi202 bestätigen die zeitliche Stabilität der Messwerte und damit ihre Vertrauenswürdigkeit für folgende geoelektrische Messungen im Bohrloch. Die Messwerte mit beteiligten Elektroden 11 (Ktzi200), 39, 41 und 44 (Ktzi202) lagen mit rund 55 Ω in der Größenordnung der Kabelwiderstände (Abb. 4.13). Folglich wurde ein elektrischer Kurzschluss gemessen. Die tiefenabhängige Zunahme der Ankopplungswiderstände in den Bohrungen war mit der zunehmenden Kabellänge erklärbar.

4.4.2 Zeitliche Überwachung spezieller Elektrodenanordnungen in jeweils einer Bohrung

4.4.2.1 Versuchsaufbau und Datenakquisition

Die geoelektrischen Messungen im Bohrloch fanden vom 20.06.08 bis 29.06.08 im Zeitraum der CO₂-Testinjektion (20.06.08) mit anschließender N₂-Injektion bis zum CO₂-Injektionsbeginn mit geringer Rate (24.06.08 bis 29.06.08) statt. Die Messungen bestanden aus einer **festen Dipol-Dipol-Anordnung in jeweils einer Bohrung**. Diese Anordnung wurde aufgrund seiner Auflösungs- und Abbildungseigenschaften ausgewählt (Kap. 2.1.3). Es wurde ein elektrischer Strom über die Stromelektroden A und B in das Deckgebirge eingespeist und der zeitliche elektrische Spannungsabfall zwischen der Spannungselektrode M (Speicherhorizont) und N (Bereich unterhalb des Speicherhorizontes) gemessen. In der Beobachtungsbohrung Ktzi200 wurde die Elektrodenanordnung A, B, M, N für die Elektroden 3, 4, 5, 14 gewählt. Analog dazu wurde für die Injektionsbohrung Ktzi201 die Anordnung 18, 19, 20, 29 und für die Beobachtungsbohrung Ktzi202 die Elektroden 32, 33, 35, 44 gemessen (Abb. 4.14).

Für eine Einzelmessung wurde jeweils in einem Zeitraum von rund 2 bis 40 min (im Durchschnitt 15 min) der zeitliche elektrische Spannungsverlauf gemessen und gemittelt. Die CO₂-Injektionsrate wurde kontinuierlich mithilfe eines Durchflussmessgerätes bestimmt (Daten nach Möller *et al.*, 2012). Der Reservoirdruck wurde in der Injektionsbohrung Ktzi201 in einer Tiefe von rund 550 m (engl.: *bottom-hole pressure, BHP*), also rund 80 m oberhalb des CO₂-Injektionspunktes, mit einem permanent installierten faseroptischen Druck-Temperatur-Sensor gemessen (Daten nach Möller *et al.*, 2012). Der Reservoirdruck am Injektionspunkt in rund 630 m Tiefe betrug somit rund 2 bar mehr als in der gemessenen Tiefe von 550 m (Martens *et al.*, 2012).

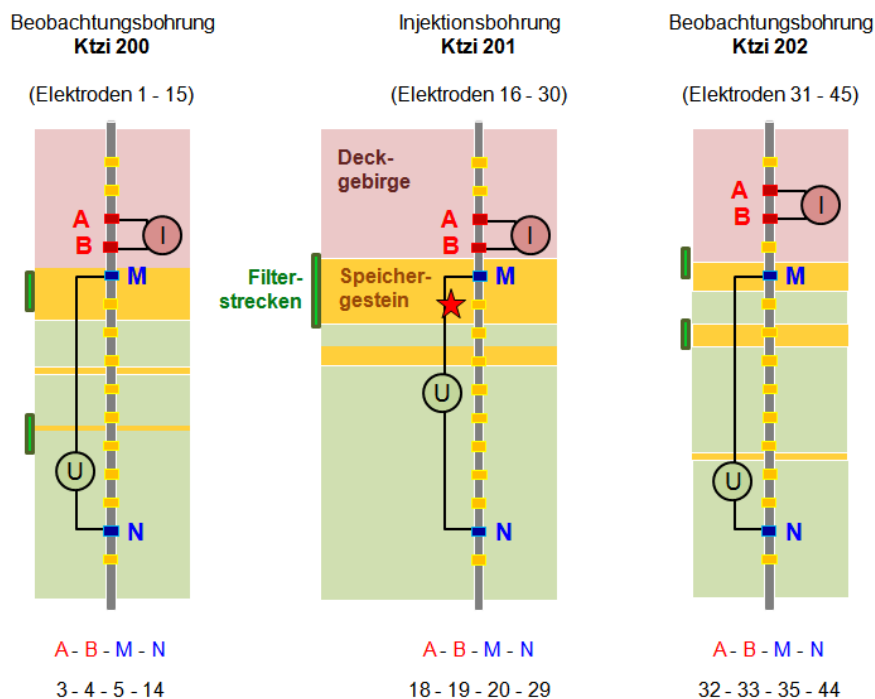


Abb. 4.14: Prinzipskizze der permanent überwachten Elektrodenanordnungen in Phase II und III zur Charakterisierung des CO₂-Injektionsprozesses. Die Stromelektroden A und B befinden sich jeweils im Tiefenbereich des Deckgebirges, die Spannungselektrode M ist jeweils im Speicherhorizont platziert und die Spannungselektrode N jeweils im Tiefenbereich unterhalb des Speicherreservoirs: Dipol-Dipol-Anordnung a) in der Beobachtungsbohrung Ktzi200: Elektroden 3 - 4 - 5 - 14; b) in der Injektionsbohrung Ktzi201: Elektroden 18 - 19 - 20 - 29; c) in der Beobachtungsbohrung Ktzi202: Elektroden 32 - 33 - 35 - 44. Die Bereiche der Filterstrecken sind jeweils am linken Abbildungsrand grün hervorgehoben und die Geologie schematisch (nach Norden *et al.*, 2010) dargestellt: Deckgebirge (rosa), Speichergestein (gelb) und Bereiche unterhalb des Speicherhorizontes (graugrün). Der rote Stern markiert den Ort der CO₂-Injektion in der Bohrung Ktzi201.

Die permanente Überwachung der festen Dipol-Dipol-Anordnung in der Injektionsbohrung Ktzi201 sollte analog zu den durchgeführten elektrischen Ankopplungsmessungen ebenfalls:

- die CO₂-Testinjektion vom 20.06.2008 mit einer einhergehenden Widerstandserhöhung im bohrlochnahen Bereich belegen
- den (Vor-)Injektionsprozess (geringe Rate ab 24.06.2008) verfolgen.

Im Gegensatz zu den elektrischen Ankopplungsmessungen, die den Übergangswiderstand der Elektroden zum Gebirge überwachen, liefert die Dipol-Dipol-Anordnung scheinbare spezifische elektrische Widerstände des Reservoirs.

4.4.2.2 Ergebnisse

Der zeitliche Verlauf der gemittelten scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstände aus 65 Einzelmessungen ist für die Elektroden 18, 19, 20, 29 der Injektionsbohrung Ktzi201 in Abbildung 4.15 zusammen mit dem Reservoirdruck in Ktzi201 und der CO₂-Injektionsrate dargestellt. Die genauen Daten (Datum, Uhrzeit, Vorinjektionsmaßnahmen, CO₂-Injektionstest) der Einzelmessungen in der Injektionsbohrung Ktzi201 sind in Tabelle A.3 aufgelistet.

Der scheinbare elektrische Widerstand stieg zu Beginn des CO₂-Injektionstests (rund 35 kg CO₂ innerhalb von 2 h) am 20.06.08 von 0,27 Ωm auf rund 0,7 Ωm an und erreichte am 21.06.08 ein Maximum von 2,7 Ωm. Im weiteren zeitlichen Verlauf sank der scheinbare spezifische elektrische Widerstand auf den Ausgangswert vom 20.06.08, bevor er am 24.06.08, zum Beginn der CO₂-Injektion mit geringer Rate, erneut anstieg und einen Wert von 1,2 Ωm erreichte.

Die CO₂-Injektionsrate und der Reservoirdruck wurden in Ktzi201 erst mit dem Beginn der CO₂-Injektion kontinuierlich aufgezeichnet. Ab dem 24.06.08 ließ sich demnach der zeitliche Verlauf der gemessenen Widerstände mit beiden Parametern vergleichen. Stieg die CO₂-Injektionsrate, so erhöhte sich neben dem Reservoirdruck auch der scheinbare elektrische Widerstand im Tiefenbereich der CO₂-Injektion. In der Injektionspause vom 25.06.08, 17 Uhr bis 26.06.08, 8 Uhr betrug die CO₂-Injektionsrate 0 t/h und der Reservoirdruck sank langsam auf rund 62 bar ab, während auch die scheinbaren elektrischen Widerstände abnahmen.

Für die Beobachtungsbohrung Ktzi200 wurde die Elektrodenanordnung 3, 4, 5, 14 (25.06.08 bis 29.06.08) und für die Beobachtungsbohrung Ktzi202 die Anordnung

32, 33, 35, 44 (29.06.08) gemessen. Da die CO₂-Ankunft an den beiden Beobachtungsbohrungen während der Phase II nicht erwartet wurde, werden die Ergebnisse dieser permanenten Messungen zusammen mit den Ergebnissen der Überwachung der CO₂-Injektion mit erhöhter Rate (ab 30.06.08) in Kapitel 4.5.2 dargestellt und bewertet. Für die beiden Beobachtungsbohrungen Ktzi200 und Ktzi202 lagen nur vereinzelte Messwerte für Phase II vor.

4.4.2.3 Interpretation und Diskussion

Die Messungen einer **festen Dipol-Dipol-Anordnung** (18, 19, 20, 29) **in der Injektionsbohrung Ktzi201** ergaben eine Erhöhung der scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstände im bohrlochnahen Bereich der Injektionsbohrung Ktzi201 mit dem Beginn der CO₂-(Test)injektion (Abb. 4.15). Die Widerstandserhöhung war sowohl mit der CO₂- und als auch mit der anschließenden N₂-Injektion zu erklären. Die Gase ließen sich anhand der Widerstandsmessung nicht unterscheiden.

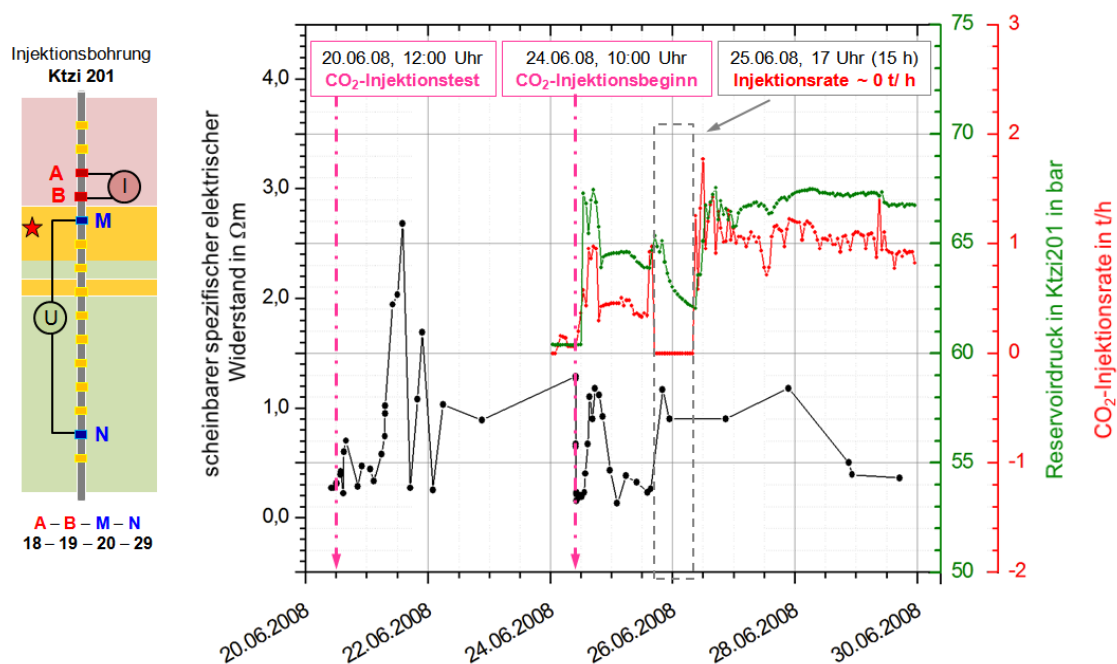


Abb. 4.15: Permanente Überwachung der CO₂-Testinjektion (20.06.08, 12 Uhr) und des CO₂-Injektionsbeginns (24.06.08, 10 Uhr) mit einer festen Dipol-Dipol-Anordnung (A, B, M, N: 18, 19, 20, 29) in der Injektionsbohrung Ktzi201. Der scheinbare spezifische elektrische Widerstand (schwarz) der festen Dipol-Dipol-Anordnung ist zusammen mit dem Reservoirdruck in 550 m Tiefe in Ktzi201 (grün) und der CO₂-Injektionsrate (rot) über der Zeit (20.06.08 bis 29.06.08) aufgetragen (Daten Reservoirdruck und Injektionsrate nach Möller *et al.*, 2012). Der rote Stern markiert den Ort der CO₂-Injektion in der Bohrung Ktzi201.

Ab dem CO₂-Injektionsbeginn am 24.06.08 ließ sich der zeitliche Verlauf der gemessenen scheinbaren elektrischen Widerstände mit dem Reservoirdruck und der CO₂-Injektionsrate (Abb. 4.15) in der Injektionsbohrung Ktzi201 korrelieren. Die CO₂-Injektionsrate und der Reservoirdruck in der Injektionsbohrung Ktzi201 waren voneinander direkt proportional abhängig. Während der CO₂-Injektion strömte das elektrisch nichtleitende Speichergas ins Reservoir und verdrängte das elektrisch leitfähige Porenfluid (Formationswasser mit rund 0,05 Ωm). Der Druck im bohrlochnahen Umfeld sowie der elektrische Widerstand des Reservoirs stiegen an. In Phasen geringerer CO₂-Injektionsraten oder während der CO₂-Injektionspausen nahm der Reservoirdruck ab und Formationswasser floß wieder ins Reservoir zurück. Folglich nahm auch der elektrische Widerstand zeitverzögert ab.

Die nach dem Beginn der CO₂-Testinjektion gemessenen Widerstandsänderungen von 0,27 Ωm auf 0,7 Ωm und im weiteren Verlauf auf 2,7 Ωm wurden in dieser Größenordnung auch in Laborexperimenten nachgewiesen. Langzeit-Durchströmungsexperimente mit CO₂ an Sandsteinproben aus einer der Beobachtungsbohrungen von Ketzin zeigten im Labor unter in-situ Bedingungen Erhöhungen des elektrischen Widerstandes von rund 0,5 Ωm auf 1,7 Ωm (z.B. Kummerow & Spangenberg, 2011; Schütt *et al.*, 2005). Sie verifizieren damit die Messergebnisse am Pilotstandort Ketzin.

4.4.3 Geoelektrische Bohrloch-Bohrloch-Messungen in Ktzi200, Ktzi201 und Ktzi202

4.4.3.1 Versuchsaufbau und Datenakquisition

Um die räumliche CO₂-Ausbreitung unmittelbar am Injektionspunkt und zeitlich unmittelbar ab dem Beginn der CO₂-Injektion beschreiben zu können, wurden geoelektrische Messungen **in allen drei Bohrungen** durchgeführt. An Hand der so gewonnenen 3D-Widerstandsverteilung sollte der geologische Speicherhorizont vor (17.06.08) und während der CO₂-Injektion mit geringer Rate (Phase II, bis 29.06.08) abgebildet und hinsichtlich seiner elektrischen Eigenschaften charakterisiert werden.

Es sollte untersucht werden, welchen Einfluss die vereinfachten Elektrodenkoordinaten, im Gegensatz zu den exakten (Kap. 3.2.3), bei der Inversionsberechnung auf das Inversionsergebnis haben. Weiterhin sollte veranschaulicht werden, inwieweit die Daten der nicht funktionsfähigen Elektroden (Kap. 4.7) das Inversionsergebnis beeinflussen.

Die geoelektrischen Messungen in allen drei Bohrungen setzten sich jeweils aus unterschiedlichen Messanordnungen zusammen: Zum einen umfassten sie klassische

Anordnungen wie Dipol-Dipol, Wenner-Alpha und Wenner-Gamma, zum anderen auch Variationen dieser Anordnungen mit veränderter Elektrodenauslagen-länge sowie Platzierungen der Stromelektroden in unterschiedlichen Bohrungen (siehe Kap. 2.1.3). Somit fanden Messungen innerhalb einer Bohrung, aber auch bohrlochübergreifend in jeweils zwei Bohrungen statt.

Für einen der 14 aufgenommenen Datensätze (Phase II) wurden mehr als 4.000 Datenpunkte aufgenommen. Die Messzeit betrug dabei bis zu 4 Stunden. Für die Nullmessung wurden mehrere Messungen, die am 17.06.08 und am 18.06.08 stattfanden, zu einem Datensatz zusammengefasst. Er umfasst somit über 15.000 Datenpunkte, von denen über 11.000 Messwerte für die Inversion genutzt werden konnten. Den größten Anteil der entfernten Messwerte hatten die Messungen mit beteiligten nicht funktionsfähigen Elektroden 11, 39 bis 45 (Kap. 4.7). Des Weiteren wurden Messungen mit injizierten Strömen unter 15 mA sowie Daten mit Standardabweichungen über 35 % zur Steigerung der Datenqualität vor der Inversion eliminiert.

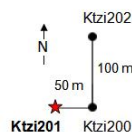
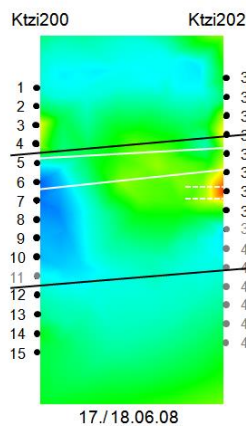
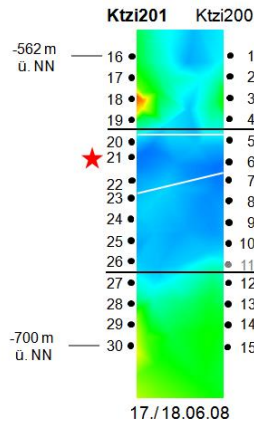
Für die 3D-Inversion wurde der Open-Source Programmcode BERT genutzt. Er nutzt einen Gauß-Newton-Minimierungsalgorithmus (Günther *et al.*, 2006) und eine Finite-Elemente-Modellierung (Rücker *et al.*, 2006) unter Verwendung von unstrukturierten Tetraedernetzen mit beliebiger Elektrodenanordnung (Kap. 2.1.4). Die wichtigsten gewählten Inversionsparameter sind in Tabelle A.9 zusammengefasst.

4.4.3.2 Ergebnisse

Abbildung 4.16 (mitte) zeigt das Inversionsergebnis der Nullmessung am 17./ 18.06.08 anhand der beiden 2D-Vertikalschnitte Ktzi201 - Ktzi200 (oben) und Ktzi200 - Ktzi202 (unten) vor dem Beginn der CO₂-(Test-)Injektion (20.06.08). Das Ergebnis zeigt eine leitfähige Schicht in der Tiefe der Stuttgart-Formation zwischen der Injektionsbohrung Ktzi201 und der naheliegenden Beobachtungsbohrung Ktzi200 mit rund 0,5 Ωm. Im Gegensatz dazu lag im bohrlochnahen Bereich der weiter entfernten Beobachtungsbohrung Ktzi202 der spezifische elektrische Widerstand dieser Schicht höher und erreicht Werte von über 2 Ωm. Die Sandsteine des Reservoirs sind von hochohmigeren Schichten mit elektrischen Widerständen von 1 bis 2 Ωm umgeben.

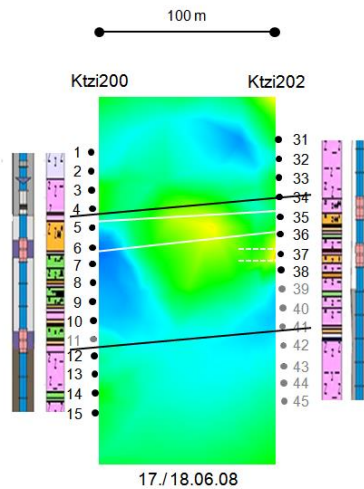
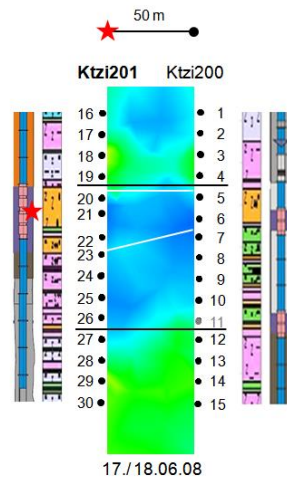
Inversion

- ohne Elektroden 11, 39-45
- mit vereinfachten Koordinaten



Inversion

- ohne Elektroden 11, 39-45
- mit exakten Koordinaten



Inversion

- mit Elektroden 11, 39-45
- mit exakten Koordinaten

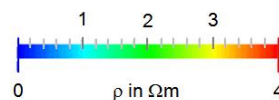
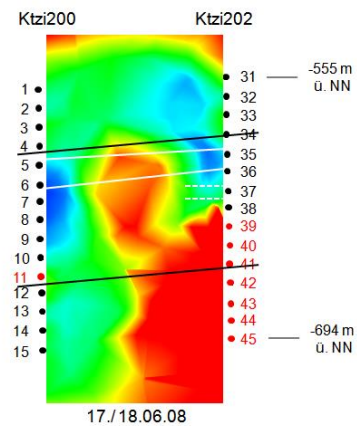
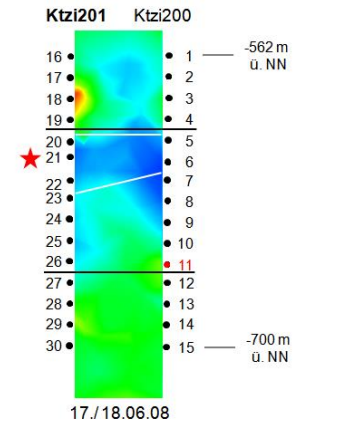


Abb. 4.16: Farbcodierte Darstellung der spezifischen elektrischen Widerstände als Inversionsergebnis der Nullmessung am 17./18.06.2008 (oben: Vertikalschnitt zwischen Ktzi201 - Ktzi200; unten: Vertikalschnitt zwischen Ktzi200 - Ktzi202). In der Mitte sind die Ergebnisse der 3D-Inversion mit ausschließlich funktionstüchtigen Elektroden und unter Nutzung der exakten Elektrodentiefen (ü. NN) dargestellt, während rechts zum Vergleich der Einfluss der nicht funktionstüchtigen Elektroden (rot markiert) auf die Inversionsergebnisse zeigt. Links sind die Inversionsergebnisse mit funktionstüchtigen Elektroden und vereinfachten Koordinaten abgebildet. In der Mitte ist die Lithologie der jeweiligen Bohrung (nach Abb. 4.8, Kap. 4.2.4.1). dargestellt. Der rote Stern markiert den Ort der CO₂-Injektion in der Bohrung Ktzi201. Die schwarze Markierung kennzeichnet die Stuttgart-Formation, während die weiße Markierung die schematische Tiefenlage der Sandsteinschichten darstellt.

Phase II: vor dem Start der CO₂-Injektion (bis 29.06.2008)

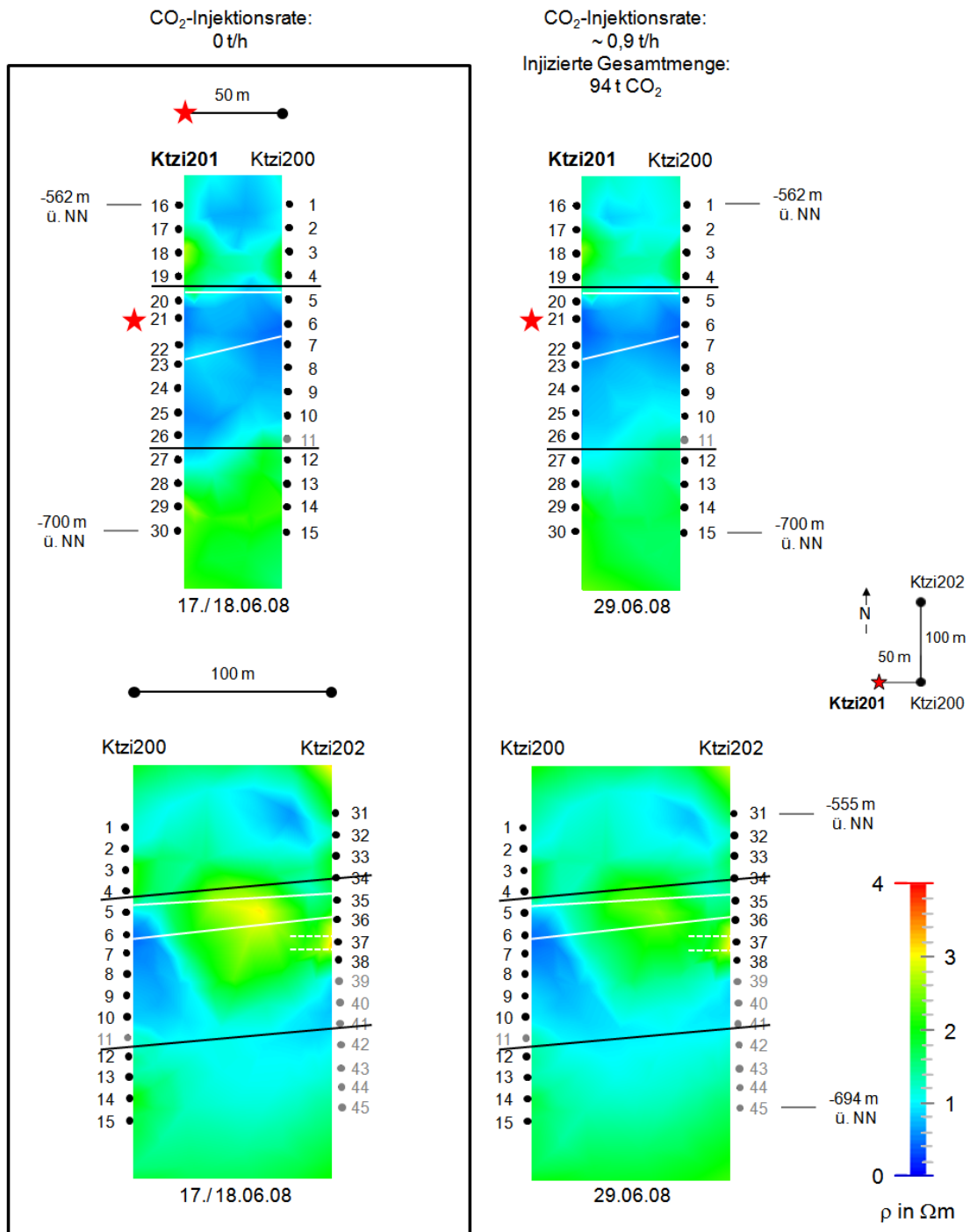


Abb. 4.17: Farbcodierte Darstellung der spezifischen elektrischen Widerstände als Inversionsergebnis der Nullmessung vom 17./18.06.2008 (links) und vom 29.06.2008 (rechts) aus Phase II (oben: Vertikalschnitt zwischen Ktzi201 - Ktzi200; unten: Vertikalschnitt zwischen Ktzi200 - Ktzi202). Der rote Stern markiert den Ort der CO₂-Injektion in der Bohrung Ktzi201. Die schwarze Markierung kennzeichnet die Stuttgart-Formation, während die weiße Markierung die schematische Tiefenlage der Sandsteinschichten darstellt.

Der Einfluss der nicht funktionstüchtigen Elektroden 39 bis 45 (Ktzi202) lieferte deutliche hochohmige Anomalien im Umfeld der Beobachtungsbohrung Ktzi202 im unteren Tiefenbereich (Abb. 4.16, rechts). Messwerte der nicht funktionsfähigen Elektrode 11 (Ktzi200) führten im Tiefenbereich der Stuttgart-Formation zu erhöhten Widerstandswerten.

Die Berechnung mit vereinfachten Elektrodenkoordinaten zeigte ein Inversionsergebnis, das der Berechnung mit exakten Koordinaten sehr ähnlich war. Allerdings traten zusätzlich elektrodennahe Inversionsartefakte in den Bereichen der Elektroden 18 (Ktzi201) und 36 bis 38 (Ktzi202) auf (Abb. 4.16, links).

Abbildung 4.17 zeigt die Inversionsergebnisse der Messung am 29.06.08 (nach Beginn der CO₂-(Test)Injektion) im Vergleich zur Nullmessung am 17./ 18.06.08 (vor CO₂-(Test)Injektion) der Phase II. Die beiden Ergebnisse sind ähnlich und weisen demnach zwar keine Widerstandserhöhungen aufgrund der CO₂-Injektion mit geringer Rate (24.06. - 29.06.08) auf, belegen jedoch die Reproduzierbarkeit der Widerstandsverteilung im Untergrund.

4.4.3.3 Interpretation und Diskussion

Die **geoelektrischen Messungen in Ktzi200, Ktzi201 und Ktzi202** lieferten eine 3D-Widerstandsverteilung im Tiefenbereich der Bohrlochelektroden vor dem Beginn der CO₂-(Test-)Injektion (Abb. 4.16, mitte). Das Inversionsergebnis der Nullmessung vom 17./ 18.06.08 konnte eine leitfähige Schicht in der Tiefe der Stuttgart-Formation zwischen der Injektionsbohrung Ktzi201 und der naheliegenden Beobachtungsbohrung Ktzi200 mit rund 0,5 Ω m abbilden. Im bohrlochnahen Bereich der weiter entfernten Beobachtungsbohrung Ktzi202 lag der spezifische elektrische Widerstand dieser Schicht höher und erreicht Werte von über 2 Ω m.

Dies lag darin begründet, dass die zusammenhängenden Sandsteinabfolgen im oberen Bereich der Stuttgart-Formation im Umfeld der Injektionsbohrung Ktzi201 und der Beobachtungsbohrung Ktzi200 rund 16 bis 19 m mächtig sind, während die Mächtigkeit im Bereich der Beobachtungsbohrung Ktzi202 lediglich 9 m betrug (Norden, 2007a, b, c). Die Sandsteine wiesen einen hohen Salzgehalt und somit einen geringen Widerstand auf (rund 0,54 Ω m nach Kummerow & Spangenberg, 2011). Die Sandsteinschichtmächtigkeit an der Bohrung Ktzi202 war mit 9 m kleiner als der Elektrodenabstand von rund 10 m. Da die Sandsteine von Schichten aus Tonen, Tonsteinen, Schluffen, Schluffsteinen und Tonmergel (Norden, 2007a, b, c) mit höheren

elektrischen Widerständen von 1 bis 2 Ω m umgeben waren, war im Umfeld der Bohrung Ktzi202 der Einfluss der umgebenen Schichten größer als der Einfluss der geringmächtigen Sandsteinschichten. Somit war auch der gemessene auflösbare Gesamtwiderstand im Umfeld von Ktzi202 größer als die Widerstände in den beiden Bohrungen Ktzi201 und Ktzi200.

Abbildung 4.16 (rechts) zeigt den Einfluss der nicht funktionstüchtigen Elektroden 11 (Ktzi200) und 39 bis 45 (Ktzi202) auf das Inversionsergebnis. Da in der Bohrung Ktzi202 die untersten 7 Elektroden nicht funktionstüchtig waren, lieferte die Inversion mit diesen Elektroden deutliche hochohmige Anomalien im Umfeld dieser nicht funktionsfähigen Elektroden. Messwerte der nicht funktionsfähigen Elektrode 11 führten im Tiefenbereich der Stuttgart-Formation zu erhöhten Widerstandswerten. Durchgeführte elektrische Ankopplungsmessungen zeigten an diesen Elektroden Werte in der Größenordnung des Bohrlochkabelwiderstandes (siehe Kap. 4.4.1 und Kap. 4.5.1). Das deutete darauf hin, dass saline Fluide des Reservoirs in das (vermutlich beschädigte) Messkabel eingedrungen waren und folglich zu einem elektrischen Kurzschluss zwischen den Einzelleitungen im Inneren des Messkabels führten (Kap. 4.7). Damit wurde gezeigt, dass die Messwerte mit beteiligten nicht funktionsfähigen Elektroden 11 und 39 bis 45 keine brauchbaren Ergebnisse liefern und somit vor den Inversionsberechnungen eliminiert werden müssen.

Abbildung 4.16 (links) zeigt den Einfluss der vereinfachten Elektrodenkoordinaten auf das Inversionsergebnis im Vergleich zum Einfluss der exakten Elektrodenkoordinaten (Abb. 4.16, mitte). Da die Abweichung der beiden Koordinaten voneinander nicht sehr groß war (siehe Tab. 3.2 und Abb. 3.3), lieferte die Inversion ähnliche Ergebnisse. Dennoch traten elektrodennahe Artefakte auf, die sich mit diesen Geometriefehlern erklären ließen. Die Genauigkeit der Elektrodenkoordinaten war somit insbesondere für Messungen im bohrlochnahen Bereich von großer Bedeutung.

Abbildung 4.17 (rechts) zeigt das Inversionsergebnis der Messung am 29.06.08 (CO₂-Injektion mit geringer Rate) im Vergleich zur Nullmessung (Abb. 4.17, links). Die Ähnlichkeit der Inversionsergebnisse lag darin begründet, dass während der Phase II die CO₂-Injektion lediglich mit geringer Rate (24.06. - 29.06.08 mit durchschnittlich 0,8 t/h) stattfand und bis zur Messung am 29.06.08 lediglich eine CO₂-Gesamtmenge von rund 100 t ins Reservoir injiziert worden war. Unter der Annahme, dass sich das CO₂ aufgrund der sehr geringen CO₂-Injektionsrate sehr langsam (lediglich bis zu 0,4 m/ Tag, nach Kempka & Kühn, 2013) im Reservoir ausbreitete, war sein Einfluss auf den Reservoirwiderstand äußerst gering. Der Beginn der CO₂-Injektion mit geringer Rate

konnte somit mittels geoelektrischer Messungen zwischen allen drei Bohrungen aufgrund der relativ großen Elektrodenabstände von 10 m nicht aufgelöst und abgebildet werden.

Die vorgestellten geoelektrischen Messungen mit der Apparatur GeoTom wurden als Erweiterung der geoelektrischen Messungen mit der Apparatur GDP-32 geplant. Aufgrund technischer Probleme lagen geoelektrische Messungen mit der GDP-32 für die Phase II erst unmittelbar nach der CO₂-Testinjektion am 20.06.08 vor (Kießling *et al.* (2010b)). Somit konnten geoelektrischen Daten für die Zeit vor der CO₂-Testinjektion ausschließlich mit der Apparatur GeoTom gewonnen werden. Trotz der geringeren Stromstärke von maximal 100 mA, der maximal 8 nutzbaren Messkanäle und auch ohne einem durchführbaren Preprocessing (im Vergleich zur GDP32: max. 3 A, 15 Kanäle, Preprocessing) konnten während der CO₂-Injektion mit der GeoTom gute reproduzierbare Messwerte gewonnen werden. Die Widerstandsverteilung zwischen den drei Bohrungen konnte hinreichend gut abgebildet werden. Auch zwischen den beiden Beobachtungsbohrungen ergab sich trotz geringem Auflösungsvermögen zwischen den beiden entfernten Bohrungen ein schlüssiges Inversionsabbild.

4.4.4 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse von Phase II

In Phase II wurden die **CO₂-Testinjektion** (20.06.08) und die **CO₂-Injektion mit geringer Rate** (24.06. - 29.06.08) erfolgreich mit geoelektrischen Messungen im Bohrloch überwacht. Es wurden Verfahren angewandt, die keinen Standard darstellen und im Rahmen dieser Arbeit für diese Problemstellung entwickelt wurden.

Die Stabilität der Messwerte nach dem Elektrodeneinbau bis zum CO₂-Injektionsbeginn und die Widerstandserhöhung im bohrlochnahen Bereich der Injektionsbohrung Ktzi201 aufgrund der CO₂-Testinjektion und der CO₂-Injektion mit geringer Rate wurden mithilfe von elektrischen Ankopplungsmessungen und geoelektrischen Bohrloch-Bohrloch-Messungen in jeweils einer Bohrungen überwacht.

Durchgeführte **elektrische Ankopplungsmessungen in Ktzi200, Ktzi201 und Ktzi202** ergaben Ankopplungswiderstände von anfangs rund 150 Ω, die ab Ende 09/2007 aufgrund von Salinitätsänderung im bohrlochnahen Umfeld auf rund 75 Ω sanken. Zurückströmendes leitfähiges Formationswasser diffundierte nach Beendigung der Bohrarbeiten in die hochohmige Bohrlochspülung und verbesserte die elektrische Ankopplung. Der Ankopplungswiderstand nahm ab und blieb bis zur CO₂-Testinjektion zeitlich konstant.

Die Elektroden 11 (Ktzi201) und 39 (Ktzi202) wurden aufgrund sehr niedriger Ankopplungswiderstände ab Mitte 02/2008 von rund $55\ \Omega$ als nicht funktionsfähig beurteilt (Kap. 4.7), ebenso die Elektroden 41 und 44 (Ktzi202).

Die Widerstandserhöhung (90 bis $135\ \Omega$) ab dem 20.06.08 im bohrlochnahen Bereich der Injektionsbohrung Ktzi201 wurde durch die CO_2 -Testinjektion, die anschließende N_2 -Injektion und die CO_2 -Injektion mit geringer Rate ($0,8\ \text{t/h}$) verursacht. Warum die Widerstandserhöhung im Bereich der Elektroden 18 und 19 (Ktzi201), und vorerst nicht im Injektionsbereich der Elektroden 20 und 21 auftrat (Ktzi201), war mit dem unzementierten Bereich oberhalb des Injektionspunktes in der Bohrung Ktzi201 zu erklären. Somit war der CO_2 -Aufstieg im Ringraum der Bohrung bis zur Elektrode 18 möglich. Die PNG-Daten der CO_2 -Sättigungsbestimmungen belegten das Vorhandensein von CO_2 im unzementierten Bereich oberhalb des Injektionspunktes.

Die durchgeführten **geoelektrischen Bohrloch-Bohrloch-Messungen mit einer festen Dipol-Dipol-Anordnung in jeweils einer Bohrung** zeigt für die Bohrung Ktzi201 eine Erhöhung der gemittelten scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstände von $0,27\ \Omega\text{m}$ auf $0,7\ \Omega\text{m}$ und anschließender Widerstandsabsenkung auf den Ausgangswert im bohrlochnahen Bereich der Injektionsbohrung Ktzi201 mit dem Beginn der CO_2 -Testinjektion am 20.06.08 und anschließender N_2 -Injektion.

Während der CO_2 -Injektion mit geringer Rate wurden Widerstandserhöhungen von rund $0,27\ \Omega\text{m}$ auf rund $1,2\ \Omega\text{m}$ gemessen. Der zeitliche Verlauf der gemessenen Widerstände konnte mit der CO_2 -Injektionsrate und dem Reservoirdruck in der Injektionsbohrung Ktzi201 erfolgreich korreliert und erklärt werden. Langzeit-Durchströmungsexperimente mit CO_2 an Sandsteinproben (Ktzi202) unter in-situ Bedingungen zeigten ebenfalls Erhöhungen des elektrischen Widerstandes von rund $0,5\ \Omega\text{m}$ auf $1,7\ \Omega\text{m}$ (Kummerow & Spangenberg, 2011).

Die Inversionsergebnisse der durchgeführten **geoelektrischen Messungen in Ktzi200, Ktzi201 und Ktzi202** bildeten eine leitfähige Schicht (rund $0,5\ \Omega\text{m}$) in der Tiefe der Stuttgart-Formation zwischen der Injektionsbohrung Ktzi201 und der naheliegenden Beobachtungsbohrung Ktzi200 ab. Diese abgebildete Schicht wurde durch die 16 bis 19 m mächtigen, formationswassergesättigten Sandsteinschichten, deren elektrischer Widerstand im Labor mit rund $0,54\ \Omega\text{m}$ bestimmt wurde (Kummerow & Spangenberg, 2011), erzeugt.

Im bohrlochnahen Bereich der weiter entfernten Beobachtungsbohrung Ktzi202 lag der spezifische elektrische Widerstand dieser Schicht höher und erreichte Werte von über $2\ \Omega\text{m}$. Die Sandsteinschichten im Umfeld dieser Bohrung waren lediglich 9 m mächtig und damit kleiner als der Elektrodenabstand von rund 10 m. Die Sandsteine waren von Schichten mit elektrischen Widerständen von 1 bis $2\ \Omega\text{m}$ umgeben (hauptsächlich Ton- und Schluffstein). Da im Umfeld der Bohrung Ktzi202 der Einfluss der umgebenen Schichten größer war als der Einfluss der gering-mächtigen Sandsteinschichten, war auch der gemessene auflösbare Gesamtwiderstand im Umfeld von Ktzi202 größer als die Widerstände in den beiden Bohrungen Ktzi201 und Ktzi200.

Es wurde der Einfluss der nicht funktionstüchtigen Elektroden 11 (Ktzi200) und 39 bis 45 (Ktzi202) auf das Inversionsergebnis gezeigt. Messwerte mit beteiligten nicht funktionsfähigen Elektroden lieferten deutliche hochohmige Anomalien und mussten deshalb vor den Inversionsberechnungen eliminiert werden.

Des Weiteren wurde der Einfluss der vereinfachten Elektrodenkoordinaten auf das Inversionsergebnis im Vergleich zum Einfluss der exakten Elektrodenkoordinaten abgebildet. Trotz prinzipiell ähnlicher Inversionsergebnisse traten elektrodennahe Artefakte auf, die sich mit diesen Geometriefehlern erklären ließen. Damit war belegt, dass die Genauigkeit der Elektrodenkoordinaten eine wichtige Rolle bei der Inversion von Bohrlochmessdaten spielte.

Als Gesamtfazit wird festgehalten, dass mittels geoelektrischer Messungen in allen drei Bohrungen der geologische Speicherhorizont erfolgreich abgebildet und hinsichtlich seiner elektrischen Eigenschaften charakterisiert wurde. Allerdings konnten sehr geringe CO_2 -Mengen zu Beginn der CO_2 -Testinjektion und bei der Injektion mit geringer Rate (bis 29.06.08) nur mithilfe von elektrischen Ankopplungsmessungen und einer zeitlichen Überwachung geoelektrischer Bohrloch-Bohrloch-Messungen mit einer festen Dipol-Dipol-Anordnung in jeweils einer Bohrung überwacht und auch aufgelöst werden. Die geoelektrischen Messungen in allen drei Bohrungen lieferten keine Inversionsergebnisse, die die CO_2 -Injektion mit geringer Rate in Phase II abzubilden vermochten, da die injizierte CO_2 -Gesamtmenge einfach zu klein war, um zu diesem Zeitpunkt eine messbare Widerstandserhöhung zu verursachen. Die tatsächliche Mächtigkeit der Sandsteinabfolgen lag mit lediglich 9 bis 18 m (Norden, 2007a, b, c) deutlich unter den von Förster *et al.* (2006) auf der Grundlage von Bohrprofilen einzelner Altbohrungen der Roskow-Antiklinale aus den 70er Jahren prognostizierten Werten von bis zu 30 m. Da der Elektrodenabstand innerhalb einer Bohrung vor Kenntnis der genauen Schichtmächtigkeiten auf 10 m festgelegt wurde, bedeuteten die geringeren

Schichtmächtigkeiten für die geoelektrischen Messungen eine schlechtere Auflösung der CO₂-Ausbreitung.

4.5 Phase III: Geoelektrische Messungen im Bohrloch während der CO₂-Injektion

Im Rahmen dieser Arbeit wurden, analog zur Phase II, ebenfalls elektrische Ankopplungsmessungen und geoelektrische Messungen im Bohrloch mit der Geoelektrikapparatur GeoTom zur Überwachung der CO₂-Injektion mit erhöhter Rate (Phase III) durchgeführt und ausgewertet. Von besonderem Interesse war die Auflösung der CO₂-Ausbreitung im Sandsteinreservoir in schichtparalleler und vertikaler Richtung zwischen den drei Bohrungen. Es wurde untersucht, wie gut sich die Bereiche zwischen dem CO₂-Injektionspunkt und der CO₂-Front im zeitlichen Verlauf der CO₂-Injektion abbilden lassen. Des Weiteren sollte die CO₂-Ankunft an den beiden Beobachtungsbohrungen mit den geoelektrischen Messungen bestimmt werden. Sie wurden mit den Ergebnissen numerischer Simulationen zum zeitlichen und räumlichen Verhalten des injizierten CO₂ und mit den Ergebnissen direkter chemischer Messungen in den Beobachtungsbohrungen verglichen.

Die durchgeführten geoelektrischen Messungen in einer bzw. in mehreren Bohrungen wurden als Erweiterung der geoelektrischen Messungen im Bohrloch mit der Apparatur GDP-32 geplant. Die Ergebnisse mit der Apparatur GDP-32 werden u.a. ausführlich in Kießling *et al.* (2010b); Schmidt-Hattenberger *et al.* (2011); Schmidt-Hattenberger *et al.* (2012); Martens *et al.* (2012); Schmidt-Hattenberger *et al.* (2013); Bergmann *et al.* (2016a) beschrieben und sind nicht Gegenstand dieser Arbeit.

4.5.1 Zeitliche Überwachung der elektrischen Ankopplung der Bohrloch-elektroden in Ktzi200, Ktzi201 und Ktzi202

4.5.1.1 Versuchsaufbau und Datenakquisition

Seit Beginn der CO₂-Injektion im 06/2008 bis zum 13.05.2009 (Phase III) wurden in unterschiedlichen Zeitintervallen elektrische Ankopplungsmessungen durchgeführt, um

- den Injektionsprozess (erhöhte Rate ab 30.06.2008) in der Injektionsbohrung Ktzi201 zu verfolgen und
- die CO₂-Ankunft an den Beobachtungsbohrungen Ktzi200 und Ktzi202 zu bestimmen.

Bei den elektrischen Ankopplungsmessungen wurde der Übergangswiderstand zwischen jeweils zwei benachbarten Elektroden gemessen. Es fanden 49 Einzelmessungen statt. Die genauen Daten (Datum, Uhrzeit, Injektionsraten) der einzelnen Messungen aus Phase III sind in Tabelle A.4 aufgelistet.

4.5.1.2 Ergebnisüberblick

In Abbildung 4.18 ist der zeitliche Verlauf der Widerstände der Einzelmessungen Nr. 27 bis 111 in den Bohrungen Ktzi200, Ktzi201 und Ktzi202 farbcodiert mit einer zusätzlichen Vergleichsmessung Nr. 112 (21.03.2012) dargestellt. Zum besseren Vergleich der Widerstandsänderungen in Phase III (Nr. 64 bis 111) sind die Messungen Nr. 27 (16.06.08, vor dem Injektionsbeginn) bis 63 (29.06.08, nach Beginn der CO₂-Injektion mit geringer Rate ab 24.06.08) aus Phase II mit dargestellt.

Die gemessenen Werte lagen in CO₂-unbeeinflussten Tiefen bei durchschnittlich rund 75 Ω . Sie schwankten zwischen 3 und 9 % um den Durchschnitt. In den beiden Beobachtungsbohrungen wurden zwischen den Elektroden 10 -11, 11 - 12 (Ktzi200) und 38 - 39, 39 - 40 (Ktzi202) analog zu den Ankopplungsmessungen in Phase II geringere Ankopplungswiderstände von rund 55 Ω gemessen.

Nach dem Beginn der CO₂-Testinjektion am 20.06.08 (12 Uhr, 30 l CO₂) wurden in der **Injektionsbohrung Ktzi201** ab der Messung Nr. 38 (20.06.08, 14 Uhr) erhöhte Werte (90 bis 135 Ω) zwischen den Elektroden 17 -18, 18 - 19 und ab Messung Nr. 39 (20.06.08, 17 Uhr) zusätzlich zwischen den Elektroden 19 - 20 gemessen. Während der CO₂-Injektion mit geringer Rate (bis 29.06.08, Messung Nr. 63) blieben diese erhöhten Werte stabil. Ab der CO₂-Injektion mit erhöhter Rate (ab 30.06.08, Messung Nr. 64) wurden an diesen Elektrodenpaaren höhere Werte von durchschnittlich 210 Ω gemessen. Ab der Messung Nr. 78 (Anfang 08/2008, 825 t CO₂) traten zusätzlich auch zwischen den Elektroden 20 - 21 und 21 - 22 sehr hohe Ankopplungswiderstände auf (durchschnittlich rund 4.000 Ω). Ab Mitte 08/2008 (Messung Nr. 83) wurden zwischen den Elektroden 17 - 18 durchschnittliche Widerstände von rund 115 Ω , zwischen den Elektroden 18 - 19 Werte von rund 160 Ω , zwischen 19 - 20, 20 - 21 und 21 - 22 Werte von durchschnittlich rund 3.900 Ω gemessen.

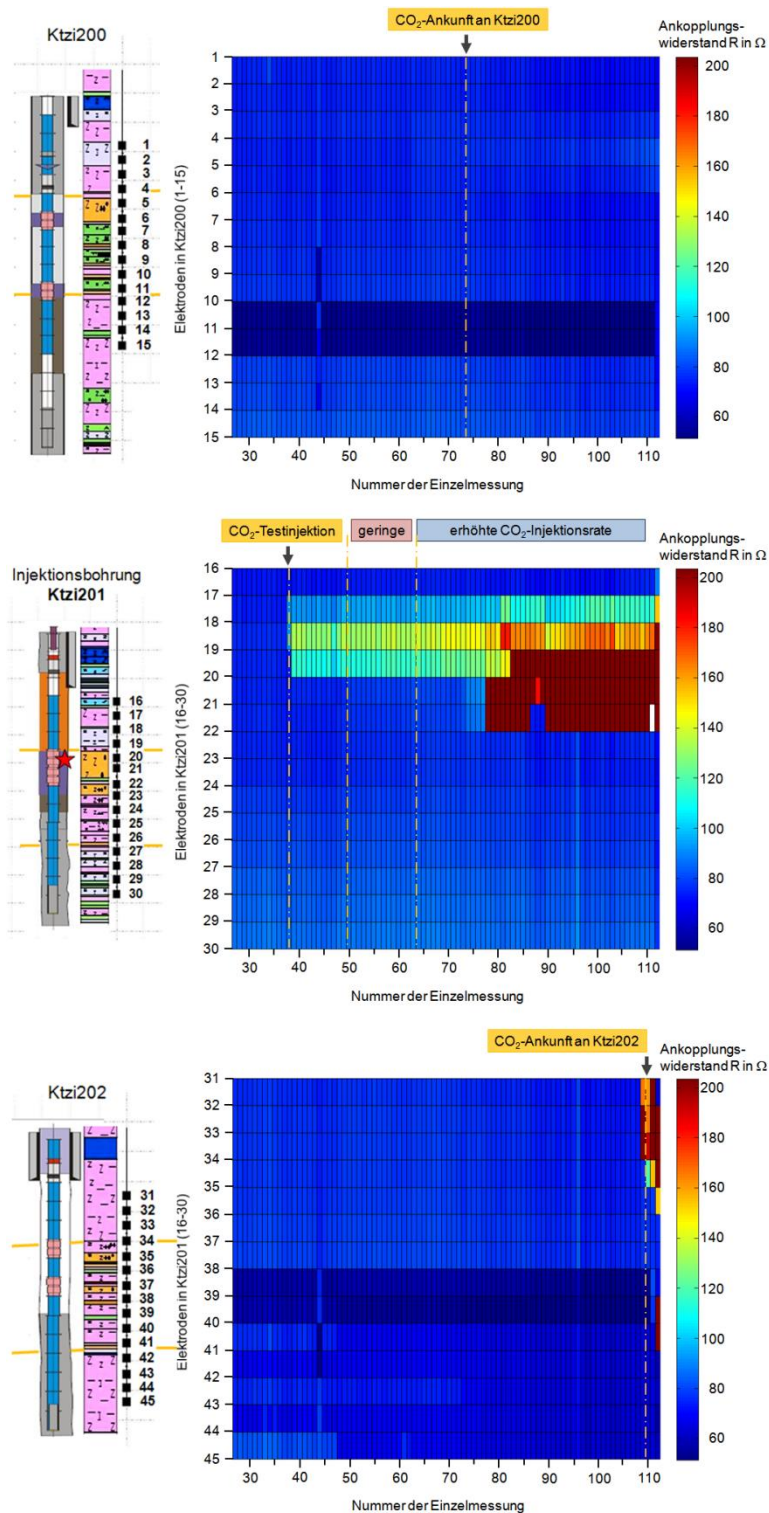


Abb. 4.18: Farbcodierte Darstellung der gemessenen Ankopplungswiderstände zwischen den jeweils benachbarten Elektroden in der Injektionsbohrung Ktzi201 (mitte) und den beiden Beobachtungsbohrungen Ktzi200 (oben) und Ktzi202 (unten) im Zeitraum vom 16.06.08 (Messung Nr. 27) bis 13.05.09 (Messung Nr. 112), sowie der Zusatzmessung Nr. 112 (21.03.2012). Links neben den Diagrammen ist die Anordnung der Vertikalelektroden mit den Zementationsbereichen und der Lithologie der jeweiligen Bohrung dargestellt (nach Abb. 4.8, Kap. 4.2.4.1). Der rote Stern markiert den Ort der CO₂-Injektion in der Bohrung Ktzi201. Die markierten CO₂-Ankunftszeiten an den beiden Beobachtungsbohrungen wurden mit dem Gasmembransensor in 150 m (u GOK) bestimmt (Zimmer *et al.*, 2011b).

In der **Beobachtungsbohrung Ktzi202** traten ab der Messung Nr. 109 (18.03.09) erhöhte Werte (170 bis 300 Ω) zwischen den Elektroden 31 - 32, 32 - 33 und 33 - 34, sowie ab der Messung Nr. 110 (06.04.09) zusätzlich zwischen den Elektroden 34 - 35 und während der Messung Nr. 112 auch zwischen den Elektroden 35 - 36 auf.

Die Ergebnisse der Ankopplungsmessungen während der CO₂-Injektion sind anhand von fünf Beispielmesskurven (Einzelmessungen) in Abbildung 4.19 dargestellt:

- Messung Nr. 37: vor dem Beginn der CO₂-Testinjektion (20.06.08, 12 Uhr)
- Messung Nr. 38: nach der CO₂-Testinjektion
- Messung Nr. 64: CO₂-Injektion mit erhöhter Rate
- Messung Nr. 75: CO₂-Injektion mit erhöhter Rate, CO₂-Ankunft an Ktzi200
- Messung Nr. 110: CO₂-Injektion mit erhöhter Rate, CO₂-Ankunft an Ktzi202.

Diese fünf Messkurven lieferten in den Tiefenbereichen ohne CO₂-Einfluss, ebenso wie Messung Nr. 37 (vor der CO₂-Injektion, Abb. 4.13) über die gesamte Tiefe, ähnliche Ankopplungswiderstände zwischen 72 Ω und 88 Ω (Abb. 4.19). Die parallel verlaufenden Kurven zeigen eine tendenzielle Widerstandserhöhung mit zunehmender Tiefe der Bohrlochelektroden. In den Tiefenbereichen der Sandsteinschichten traten während der CO₂-Injektion höhere Ankopplungswiderstände auf. Während der CO₂-Injektion mit erhöhter Rate wurden an den Elektroden 18 bis 21 sehr hohe Ankopplungswiderstände von anfangs 90 Ω (Nr. 38) bis zu 39.000 Ω (Nr. 111) gemessen. Die Elektroden 20 und 21 lagen im Injektionstiefenbereich von Ktzi201. In den beiden Beobachtungs-bohrungen befanden sich die Elektroden 4 bis 6 (Ktzi200) sowie 35 und 36 (Ktzi202) im Sandsteinhorizont. Während bei der CO₂-Ankunft an Ktzi200 nur geringe Widerstandserhöhungen sichtbar waren, wurden bei der CO₂-Ankunft an Ktzi202 an den Elektroden 31 bis 34 hohe Ankopplungswiderstände von bis zu 200 Ω gemessen. Analog zu Abbildung 4.18 waren die geringeren Ankopplungswiderstände von rund 55 Ω zwischen den Elektroden 10 - 11, 11 - 12 (Ktzi200) und 38 - 39, 39 - 40 (Ktzi202) in allen fünf Beispieleinzelmessungen erkennbar, während zwischen den Elektroden 41 - 42 und 43 - 44 (Ktzi202) verringerte Ankopplungswiderstände von rund 65 Ω (Messung 37, 38 und 64) auftraten.

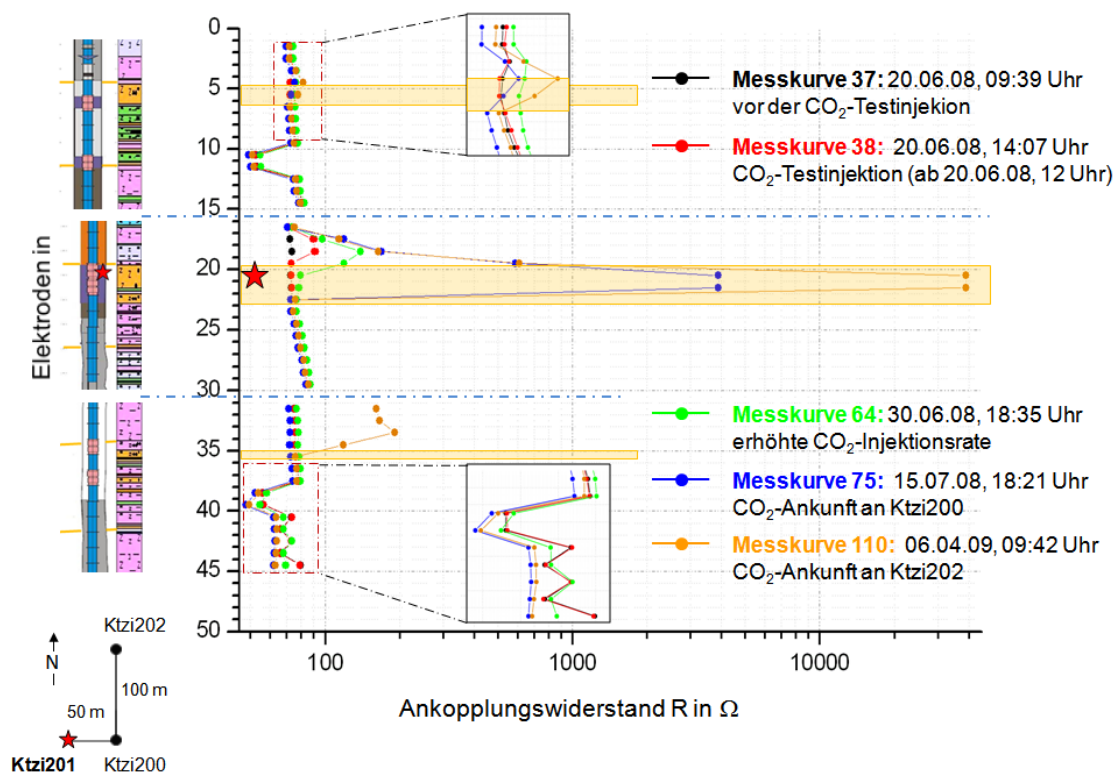


Abb. 4.19: Darstellung der gemessenen Ankopplungswiderstände zwischen den jeweils benachbarten Elektroden in allen drei Bohrungen für die Beispielmesskurven 37, 38, 64, 75 und 110. Während die Messung 37 (schwarz) zeitlich kurz vor dem Beginn der CO₂-Testinjektion (20.06.08, 12 Uhr) stattfand, wurde die Messkurve 38 (rot) direkt nach der CO₂-Testinjektion aufgenommen. Die Messkurven 64 (grün), 75 (blau) und 110 (orange) fanden während der CO₂-Injektion mit erhöhter Rate statt. Die Tiefenlage des Sandsteinreservoirs ist gelb hinterlegt und der rote Stern markiert den Ort der CO₂-Injektion in der Bohrung Ktzi201.

4.5.1.3 Zeitlicher Verlauf der Ankopplungsmessungen in der Injektionsbohrung und Diskussion der Ergebnisse

Die erhöhten Ankopplungswiderstände in der Injektionsbohrung Ktzi201 ab der Messung Nr. 38/ 39 an den Elektroden 18 und 19 lassen sich auf die CO₂-Testinjektion mit anschließender N₂-Injektion (Phase II) zurückführen. Das injizierte elektrisch nichtleitende CO₂ bzw. N₂ verursachte eine schlechtere Ankopplung und somit eine Erhöhung der Ankopplungswiderstände. Die CO₂-Injektion mit geringer Rate von durchschnittlich 0,8 t/h (24.06.08 bis 29.06.08, Messung Nr. 50 bis 63) verursachte ebenfalls erhöhte Werte im selben Tiefenbereich wie bei der CO₂-Testinjektion (Kap. 4.4.1). Ab der Messung Nr. 78 verursachte die CO₂-Injektion mit erhöhter Rate (durchschnittlich rund 2,0 t/h) an den Elektroden 20 und 21 (Tiefenbereich der CO₂-Injektion) sehr hohe Ankopplungswiderstände (Abb. 4.18).

Dass von der Widerstandserhöhung nicht nur die in der Sandsteinformation liegenden Elektroden betroffen waren, sondern auch die darüber liegenden (18 und 19), konnte mit dem CO₂-Aufstieg im unzementierten Ringraum der Bohrung erklärt werden. Picotti *et al.* (2013) stellten in ihrer Modellstudie für den CO₂-Speicherstandort Ketzin fest, dass sich erst mit einem theoretischen Elektrodenabstand von 0,5 m dünne hochohmige bohrlochnahe Zonen mittels geoelektrischer Messungen im Bohrloch auflösen lassen. Sie würden beispielsweise auf aufsteigendes CO₂ im Bohrlochringraum hindeuten. Elektrische Ankopplungsmessungen lieferten in Ketzin trotz eines Elektrodenabstandes von 10 m ein ähnlich gutes Ergebnis. Eine CO₂-Ausbreitung im Ringraum konnte in Ktzi201 (bis Elektrode 18) und in Ktzi202 (bis Elektrode 31) nachgewiesen werden. Das CO₂ breitete sich im unzementierten Ringraum aus, stieg nach oben und sorgte für eine schlechte Ankopplung der Elektroden an die Bohrlochumgebung. Dies war anhand hoher Ankopplungswiderstände messbar. Die PNG-Daten (CO₂-Sättigungsbestimmungen mit dem Puls-Neutron-Gamma-Verfahren) belegten, dass CO₂ in den unzementierten Bereich oberhalb des Reservoirs eingedrungen war (Bergmann *et al.*, 2012).

Abbildung 4.20a zeigt die gemessenen Werte in der Injektionsbohrung Ktzi201 jeder Einzelmessung (Messung Nr. 27 bis 111, 16.06.08 bis 13.05.09) im zeitlichen Verlauf vor und während der CO₂-Injektion (Phase II und III). Die Werte aus Tiefenbereichen ohne CO₂-Einfluss waren einander sehr ähnlich. Die gemessenen Werte lagen für diese Elektroden zwischen 72 Ω und 88 Ω , wobei die parallelen Kurvenverläufe der Einzelmessungen die Stabilität der Messwerte gut beschrieben. Die tendenzielle Widerstandserhöhung mit zunehmender Tiefe der Bohrlochelektroden war mit der zunehmenden Kabellänge erklärbar (Kap. 4.4.1).

Die CO₂-(Test)Injektion verursachte ab der Messung Nr. 38 (20.06.08) an den Elektroden 18 und 19 Widerstandserhöhungen von durchschnittlich rund 75 Ω auf 90 bis 180 Ω . Ab der Messung Nr. 78 (05.08.08) stieg der elektrische Ankopplungswiderstand zwischen den Elektroden 19 und 20 auf Werte zwischen 130 Ω und 1.500 Ω . Er ließ sich mit dem in Ktzi201 gemessenen Reservoirdruck (BHP in 550 m (u GOK), Möller *et al.*, 2012) und der CO₂-Injektionsrate korrelieren (Abb. 4.20b). Mit zunehmendem Reservoirdruck stieg auch der zwischen den Elektroden 19 und 20 gemessene Ankopplungswiderstand an. Bei sinkendem Reservoirdruck nahm der Widerstand ab. Während der Injektionspausen (z.B. während Messung Nr. 86 - 89, 27.08.08 - 22.09.08) nahm der Reservoirdruck in Ktzi201 zeitverzögert ab und damit auch der Ankopplungswiderstand zwischen der Elektrode 19 und 20 (Abb. 4.20b).

Schwankungen im elektrischen Widerstand waren somit durch unterschiedliche CO₂-Injektionsraten erklärbar und mussten bei der Auswertung und Interpretation berücksichtigt werden.

Mit dem Start der CO₂-Injektion (Messung Nr. 38) war an Elektrode 21 eine kontinuierliche Erhöhung der Widerstände erkennbar. Ab der Messung Nr. 78 (05.08.08) stiegen die Werte sprunghaft auf durchschnittlich rund 3.900 Ω an. Während der Injektionspause vom 25.08.08 bis 24.09.08 (Messung Nr. 86 - 89, 27.08.08 -22.09.08) sanken die Widerstände zwischen den Elektroden 20 und 21 auf rund 215 Ω und zwischen den Elektroden 21 und 22 auf rund 70 Ω ab. Mit Fortführung der Injektion stiegen die Werte ab der Messung Nr. 90 (06.10.08) wieder auf durchschnittlich rund 3.900 Ω . Während der Einzelmessung 110 (06.04.09) und 111 (13.05.09) erhöhte sich der Ankopplungswiderstand weiter auf rund 39.000 Ω . Die unter Beteiligung von Elektrode 21 gemessenen stark erhöhten Widerstände ab Messung Nr. 78 (05.08.08) waren mit der unmittelbaren Nähe der Elektrode zum CO₂-Injektionspunkt erklärbar.

4.5.1.4 Übersicht der Ankopplungsmessungen in den beiden Beobachtungsbohrungen und Diskussion der Ergebnisse

Eine weitere wesentliche Intention der elektrischen Ankopplungsmessungen war der Nachweis der CO₂-Ankunft an den beiden Beobachtungsbohrungen Ktzi200 und Ktzi202. Umschloss das elektrisch nichtleitende CO₂ die Elektroden der Beobachtungsbohrungen, so änderte sich damit die Ankopplung dieser Elektroden an den Untergrund und führte dort zu einer Erhöhung der Widerstände. Abbildung 4.18 zeigt jedoch ab Messung Nr. 74, nach der Injektion von 531 t CO₂ (15.07.08), keine sichtbaren Widerstandserhöhungen in der **Beobachtungsbohrung Ktzi200**. Die CO₂-Ankunft am 15.07.08 konnte allerdings mittels GMS-Messung in Ktzi200 bestätigt werden (Schilling *et al.*, 2009).

Die Idee einer alternativen Datenauswertung bestand darin, geringe Widerstandserhöhungen mittels Widerstandsdifferenzen sichtbar zu machen und die CO₂-Ankunft an der Beobachtungsbohrung Ktzi200 nachzuweisen. Die Werte innerhalb einer Einzelmessung schwankten im Bereich der Größenordnung der Erhöhung der Messwerte aufgrund der CO₂-Ankunft.

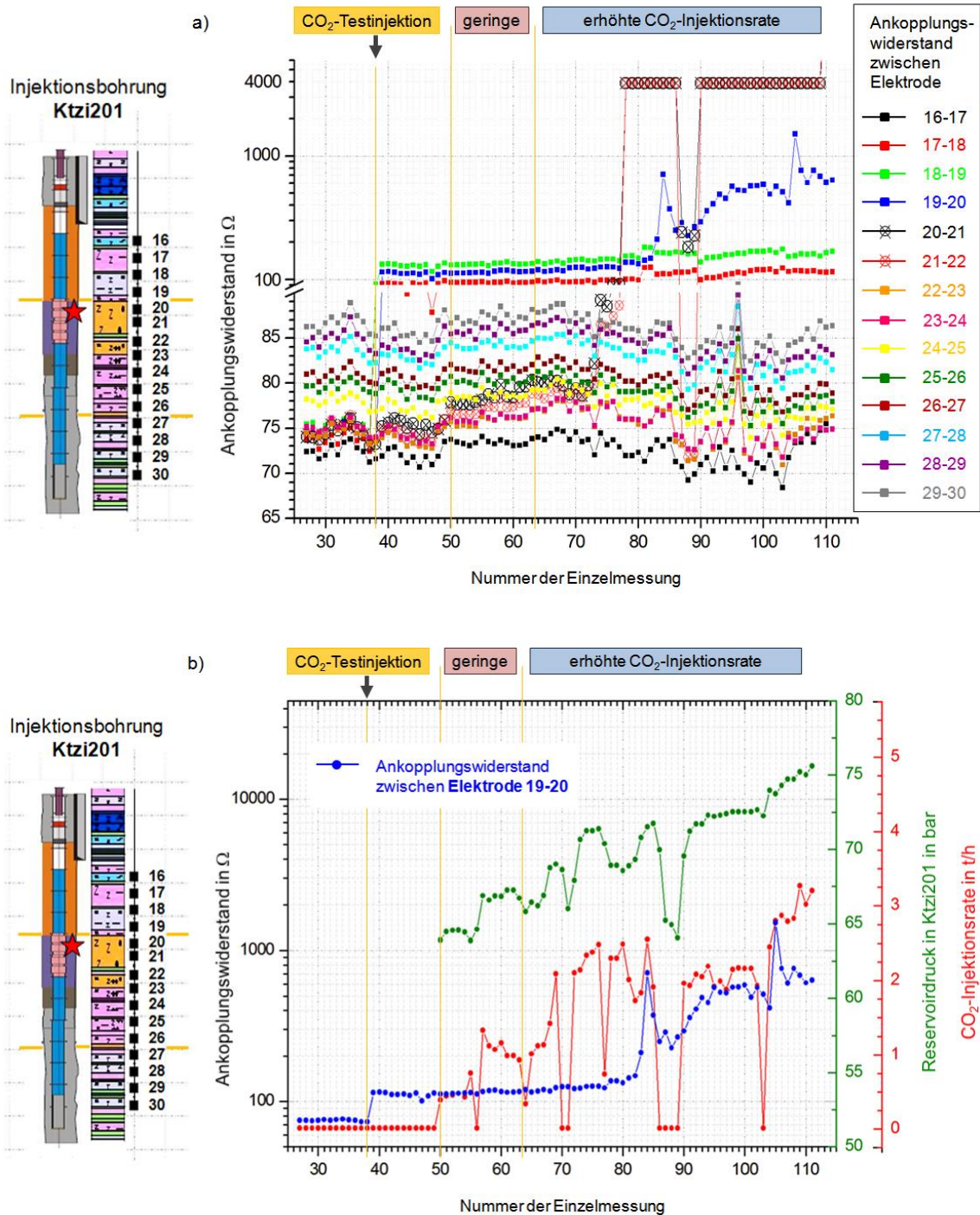


Abb. 4.20: a) Darstellung der gemessenen Ankopplungswiderstände zwischen allen Elektroden in der Injektionsbohrung Ktzi201 für jede Einzelmessung Nr. 27 (16.06.08, vor dem CO₂-Injektionsbeginn) bis 111 (13.05.09, während der CO₂-Injektion). Links ist die Anordnung der Vertikalelektroden mit den Zementationsbereichen und der Lithologie der Bohrung dargestellt (nach Abb. 4.8, Kap. 4.2.4.1). b) Darstellung der Abhängigkeit der gemessenen Ankopplungswiderstände zwischen den Elektroden 19 - 20 (blau) vom Reservoirdruck (grün) und von der CO₂-Injektionsrate (rot) jeweils in der Injektionsbohrung Ktzi201 im Zeitraum vom 16.06.08 (Messung Nr. 27) bis 13.05.09 (Messung Nr. 111). Links ist die Anordnung der Vertikalelektroden mit den Zementationsbereichen und der Lithologie der Bohrung dargestellt (nach Abb. 4.8, Kap. 4.2.4.1).

Um den Schwankungsbereich der Differenzen zu ermitteln wurde der Mittelwert der Einzelmesswerte von den Elektrodenkombinationen aus Tiefenbereichen ohne CO₂-Einfluss (1 - 2, 2 - 3, 6 - 7 und 7 - 8) berechnet. Anschließend wurde die Abweichung vom Mittelwert der Einzelmesswerte von den Elektrodenkombinationen aus dem Tiefenbereich mit vermutetem CO₂-Einfluss bestimmt. Dieser Tiefenbereich umfasste die Sandsteine der Stuttgart-Formation und somit die Elektrodenkombinationen 3 - 4, 4 - 5 und 5 - 6.

Abbildung 4.21 zeigt die farbcodierten Änderungen der gemessenen Werte einer Einzelmessung zum Mittelwert aller Werte der Messungen Nr. 27 bis 37 (vor der CO₂-(Test)Injektion) in der Beobachtungsbohrung Ktzi200 im Zeitraum vom 20.06.08 (Messung Nr. 38) bis 13.05.09 (Messung Nr. 111), sowie der Zusatzmessung Nr. 112 (21.03.2012). Beispielmesskurven (Einzelmessungen) sind für ausgewählte Messungen (Nr. 38, 74, 75, 105 und 110) in Abbildung 4.22 zusammengefasst. In beiden Abbildungen sind erhöhte Ankopplungswiderstände zwischen den Elektroden 3 - 4, 4 - 5 und 5 - 6 zu erkennen. Die Widerstandserhöhungen wiesen auf die CO₂-Ankunft an der Beobachtungsbohrung Ktzi200 hin.

In Abbildung 4.21 beträgt die Differenz zwischen den einzelnen Werten in Ktzi200 generell maximal 1,9 Ω (Messungen Nr. 63 - 76). Die Abweichung der Werte zwischen Elektroden ohne CO₂-Einfluss und zwischen Elektroden mit vermutetem CO₂-Einfluss lag damit bei rund 2,5 %. Die durchschnittliche Schwankung aller Werte lag bei 1,5 % und entspricht 1 Ω . Diese Schwankungen traten an allen Elektroden auf. Erst ab Messung Nr. 77 (16.07.08) waren Widerstandserhöhungen ausschließlich im Bereich des Speicherhorizontes (Elektrode 5) zu beobachten und mit der CO₂-Ankunft an dieser Beobachtungsbohrung zu erklären.

Die gemittelten Werte der Messungen Nr. 83 - 111 an Elektroden ohne CO₂-Einfluss betrugen rund 72 Ω , während die Schwankungen um den Durchschnittswert bei maximal 4 % lagen (69 - 72 Ω). Der Mittelwert der Messungen Nr. 83 - 111 an den Elektroden 4 - 5 mit vermutetem CO₂-Einfluss betrug rund 77 Ω , während die Schwankungen bei maximal 6 % lagen (74 - 82 Ω). Somit hatten die Widerstände an den Elektroden mit vermutetem CO₂-Einfluss geringfügig höhere Werte als die Widerstände an den Elektroden ohne CO₂-Einfluss.

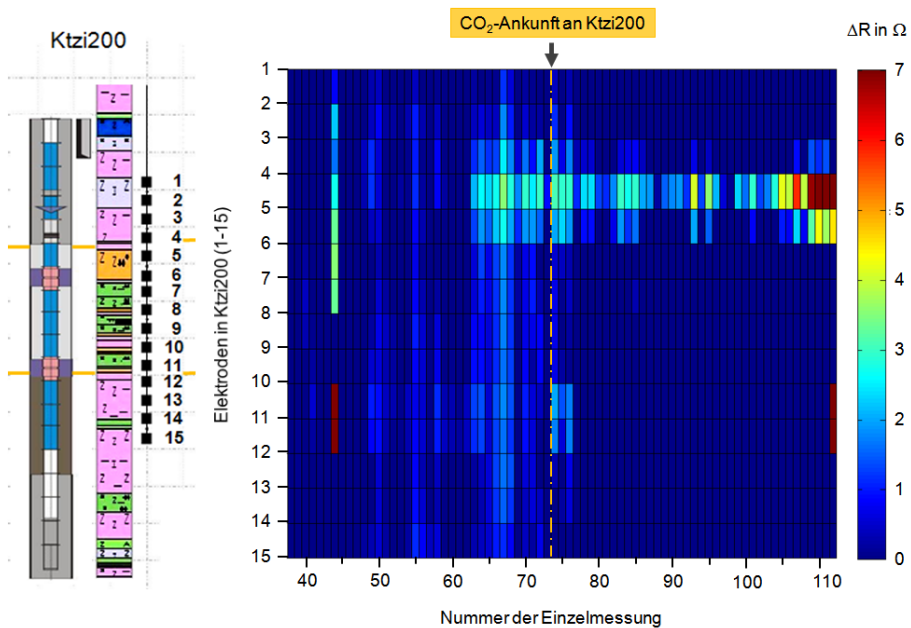


Abb. 4.21: Farbcodierte Darstellung der Änderungen der gemessenen Ankopplungswiderstände zum Mittelwert der gemessenen Ankopplungswiderstände aus der Messung Nr. 27 bis 37 (vor der CO₂-(Test)Injektion) zwischen den jeweils benachbarten Elektroden in der Beobachtungsbohrungen Ktzi200 im Zeitraum vom 20.06.08 (Messung Nr. 38) bis 13.05.09 (Messung Nr. 111), sowie der Zusatzmessung Nr. 112 (21.03.2012). Links ist die Anordnung der Vertikalelektroden mit den Zementationsbereichen und der Lithologie der Bohrung dargestellt (nach Abb. 4.8, Kap. 4.2.4.1). Die markierte CO₂-Ankunftszeit an der Beobachtungsbohrung Ktzi200 wurden mit dem Gasmembransensor in 150 m (u GOK) innerhalb der Verrohrung bestimmt (Zimmer *et al.*, 2011b).

Die Abweichungen der gemittelten Widerstände sind für diese Messungen in Ktzi200 abschließend zusammengefasst:

- Nr. 27 - 72 (16.06.08 - 11.07.08, vor der CO₂-Ankunft): 0,02 % (0,02 - 2,48 %)
- Nr. 73 - 77 (14.07.08 - 16.07.08, CO₂-Ankunft, 550 t CO₂): 1,82 % (1,11 - 2,32 %)
- Nr. 78 - 82 (05.08.08 - 07.08.08, 900 t CO₂): 2,39 % (1,73 - 2,88 %)
- Nr. 83 - 111 (12.08.08 - 13.05.09, 14.680 t CO₂): 5,13 % (2,22 - 9,37 %).

Die alternative Datenauswertung des Sichtbarmachens der geringen Widerstandserhöhungen mittels Widerstandsdifferenzen ermöglichte somit den Nachweis der CO₂-Ankunft an der Beobachtungsbohrung Ktzi200 (Abb. 4.22).

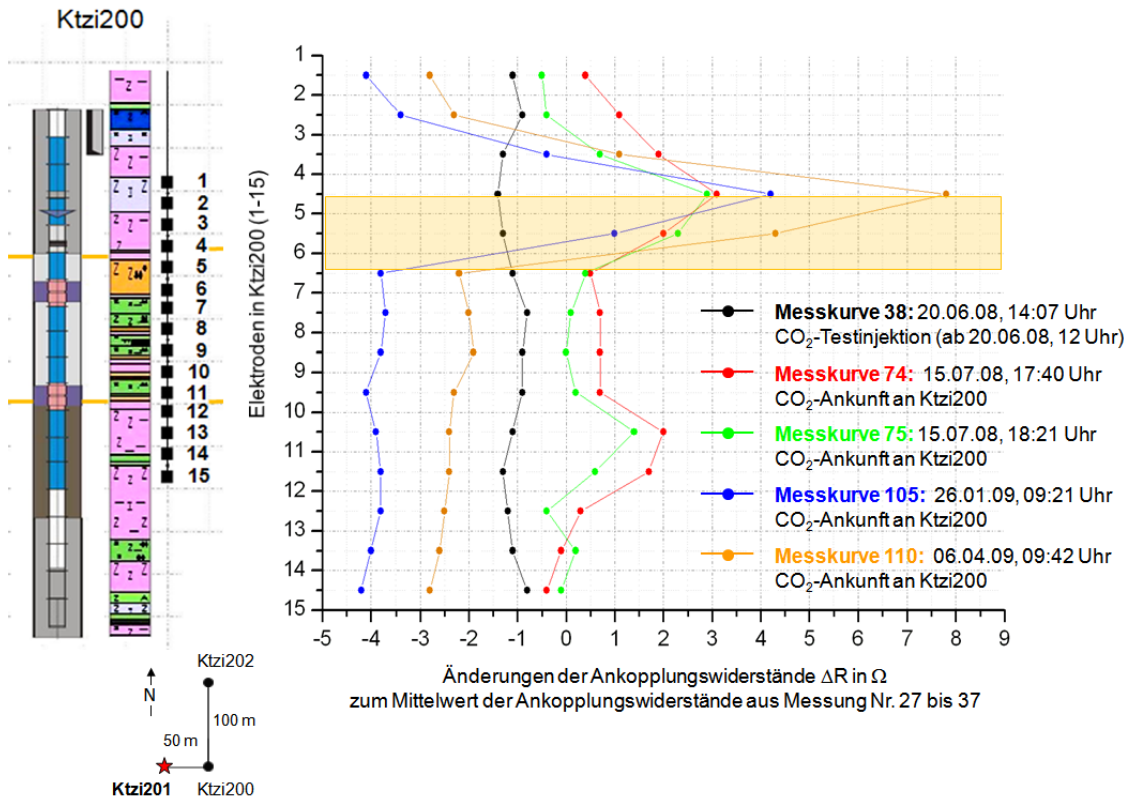


Abb. 4.22: Darstellung der Änderungen der gemessenen Ankopplungswiderstände zum Mittelwert der gemessenen Ankopplungswiderstände aus der Messung Nr. 27 bis 37 (vor der CO₂-(Test)injektion) zwischen den jeweils benachbarten Elektroden in der Beobachtungsbohrung Ktzi200 für die Beispielmesskurven 38, 74, 75, 105 und 110. Während die Messung 38 (schwarz) zeitlich zum Beginn der CO₂-Testinjektion (20.06.08, 12 Uhr) stattfand, wurden die Messkurven 74 (rot), 75 (grün), 105 (blau) und 110 (orange) während der CO₂-Injektion mit erhöhter Rate aufgenommen. Links ist die Anordnung der Vertikalelektroden mit den Zementationsbereichen und der Lithologie der Bohrung dargestellt (nach Abb. 4.8, Kap. 4.2.4.1). Die Tiefenlage des Sandsteinreservoirs ist gelb hinterlegt.

Die CO₂-Ankunft an der **Beobachtungsbohrung Ktzi202** ist in Abbildung 4.18 deutlich ab der Messung Nr. 109 (18.03.09) anhand einer ausgeprägten Widerstandserhöhung zwischen den Elektroden 31 - 32, 32 - 33 und 33 - 34 erkennbar. Während der Messung Nr. 110 (06.04.09) und 111 (13.05.09) wurden zwischen den Elektroden 34 -35 und bei der Zusatzmessung Nr. 112 (21.03.12) auch zwischen den Elektroden 35 -36 erhöhte Werte gemessen. GMS-Messungen innerhalb der Verrohrung bestätigten die CO₂-Ankunft in 150 m Tiefe (u GOK) am 22.03.09 (Zimmer *et al.*, 2011b) nach einer Injektionsmenge von rund 11.000 t CO₂. Eine mögliche Erklärung der zeitlichen Ankunftszeitpunkte könnte folgende sein: Nachdem das ankommende CO₂ an den entsprechenden Elektroden der Beobachtungsbohrung für erhöhte Ankopplungswiderstände sorgte, breitete es sich danach durch die Schlitze der Filterrohre in das Innenrohr aus, um in der Flüssigkeitssäule bis auf 150 m (u GOK) aufzusteigen. Erst in

dieser Tiefe konnte das CO₂ vom GMS-Sensor direkt gemessen werden. Da die Elektroden im Bereich der Deckschicht nicht zementiert wurden und sich somit im offenen Bohrloch befanden (Abb. 4.18), stieg das CO₂ im Ringraum der Bohrung Ktzi202 auf und führte zusätzlich an den Elektroden 31 bis 34 zu Widerstands-erhöhungen.

Abbildung 4.19 zeigt anhand der Beispielmesskurven 38, 64, 75 und 110 in der Injektionsbohrung Ktzi201 eine Widerstandserhöhung im Vergleich zur Beispielmesskurve 37 (vor Injektionsbeginn), die auf die CO₂-Injektion (Phase III) zurückzuführen ist. Die CO₂-Ankunft an der Beobachtungsbohrung Ktzi200 war durch eine geringe Widerstandserhöhung im Bereich der Elektrode 5 gekennzeichnet (Messung 75 und 110). In der Beobachtungsbohrung Ktzi202 spiegelte sich die CO₂-Ankunft in einer deutlicheren Widerstandserhöhung im oberen Elektrodenbereich wider (Messung 110). Aufgrund der unzementierten Bereiche stieg das CO₂ im Ringraum auf und verursachte an den oberen Elektroden oberhalb des Sandsteinhorizontes eine Erhöhung der Ankopplungswiderstände.

Die Elektroden 11 (Ktzi200) und 39 (Ktzi202) zeigten auch in Abbildung 4.19, dass sie aufgrund ihrer gemessenen, niedrigen Ankopplungswiderstände nicht funktionstüchtig blieben. Der sehr geringe Ankopplungswiderstand (Kurzschlussmessung) mit beteiligter Elektrode 39 konnte gesichert mit dem Eintritt von salinen Fluiden in das (vermutlich während des Einbaus beschädigte) Messkabel (Ktzi202) erklärt werden. Bergmann *et al.* (2012) beschrieb einen beobachteten Fluidaustritt am Messkabel der Bohrung Ktzi202 an der Erdoberfläche. Da die Adern der einzelnen Anschlusskabel für die Elektroden 39 bis 45 (ebenfalls niedrige Werte) sich im Messkabel dicht nebeneinander befanden (Schmidt-Hattenberger *et al.*, 2011), lag die Vermutung nahe, dass die Elektroden 40 bis 45 aufgrund des Fluideintritts ebenfalls nicht funktionstüchtig blieben.

4.5.2 Zeitliche Überwachung spezieller Elektrodenanordnungen in jeweils einer Bohrung

4.5.2.1 Versuchsaufbau und Datenakquisition

Im Zeitraum vom 30.06.08 bis 13.05.09 (Phase III) fanden zur Überwachung der CO₂-Injektion mit erhöhter Rate und zur Bestimmung der CO₂-Ankunft an den beiden Beobachtungsbohrungen geoelektrische Messungen mit einer festen Dipol-Dipol-Anordnung in jeweils einer Bohrung statt. Es wurde ein elektrischer Strom über die Stromelektroden A und B in das Deckgebirge eingespeist und der zeitliche elektrische Spannungsabfall zwischen der Spannungselektrode M (Speicherhorizont) und N

(Bereich unterhalb des Speicherhorizontes) in einem bestimmten Zeitintervall gemessen. In der Beobachtungsbohrung Ktzi200 wurde die Elektrodenanordnung A, B, M, N für die Elektroden 3, 4, 5, 14 gewählt. Analog dazu wurde für die Injektionsbohrung Ktzi201 die Anordnung 18, 19, 20, 29 und für die Beobachtungsbohrung Ktzi202 die Elektroden 32, 33, 35, 44 gemessen (Abb. 4.14, Kap. 4.4.2).

Die permanente Überwachung der festen Dipol-Dipol-Anordnung in jeder Bohrung sollte ebenso wie die durchgeführten Ankopplungsmessungen:

- den Injektionsprozess (erhöhte Rate ab 30.06.2008) in der Injektionsbohrung Ktzi201 verfolgen und
- die CO₂-Ankunft an den Beobachtungsbohrungen Ktzi200 und Ktzi202 messen.

Es wurden 36 Einzelmessungen in Ktzi201, 41 Einzelmessungen in Ktzi200 und 34 Einzelmessungen in Ktzi202 durchgeführt. Für eine Einzelmessung wurde jeweils in einem Zeitraum von rund 7 bis 20 min (im Durchschnitt 15 min) der zeitliche elektrische Spannungsverlauf gemessen und gemittelt. Die genauen Daten (Datum, Uhrzeit, Injektionsbeginn, CO₂-Ankunftszeiten) der Einzelmessungen sind jeweils in Tabelle A.5, A.6 und A.7 aufgelistet.

Im Gegensatz zu den elektrischen Ankopplungsmessungen, die den Übergangswiderstand der Elektroden zum Gebirge überwachten, lieferten die geoelektrischen Messungen spezifische elektrische Widerstände, die direkte Rückschlüsse auf die CO₂-Ausbreitung zuließen. Da geoelektrische Modellierungen zur CO₂-Ausbreitung im Aquifer (z.B. Hagrey, 2011; Kiessling *et al.*, 2010b; Christensen *et al.*, 2006; Ramirez *et al.*, 2003), Laboruntersuchungen unter in-situ Bedingungen (z.B. Kummerow & Spangenberg, 2011; Schütt *et al.*, 2005) und Widerstandsmessungen mittels Bohrlochlogging (Kap. 3.3.3) vorlagen, ließen sich die spezifischen elektrischen Widerstände mit diesen Werten korrelieren und interpretieren.

4.5.2.2 Ergebnisse

Der zeitliche Verlauf der gemittelten scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstände in der **Injektionsbohrung Ktzi201** ist in Abbildung 4.23 und in Abbildung 4.24 jeweils zusammen mit dem Reservoirdruck und der CO₂-Injektionsrate für den Zeitraum der Messungen vom 01.07.08 bis 06.10.08 bzw. vom 17.11.08 bis 13.05.09 dargestellt. In diesen beiden Zeiträumen wechselten sich Injektionsphasen mit erhöhter Injektionsrate (rund 1,8 t/h) mit längeren Injektions-pausen (über mehrere Tage) ab.

Der scheinbare elektrische Widerstand stieg am 05.07.08 von 0,4 Ωm auf rund 0,8 Ωm an, bevor er am 07.07.08 zeitverzögert zu einer Injektionspause (05.07.08, 17 Uhr bis 10.07.08, 15 Uhr) auf rund 0,3 Ωm absank (Abb. 4.23). Im weiteren Injektionsverlauf erreichte der scheinbare spezifische elektrische Widerstand am 15.07.08 einen Wert von 1,1 Ωm , bevor er während einer erneuten Injektionspause (18.07.08, 18 Uhr bis 01.08.08, 11 Uhr) auf rund 0,4 Ωm absank. Am 07.08.08 erreichte der scheinbare spezifische elektrische Widerstand einen maximalen Wert von 1,7 Ωm , bevor er zeitverzögert zu einer weiteren Injektionspause (25.08.08, 3 Uhr bis 24.09.08, 12 Uhr) erneut auf rund 0,3 Ωm absank.

Der zeitliche Verlauf der gemittelten Widerstände korrelierte mit der CO_2 -Injektionsrate und dem Reservoirdruck in Ktzi201 (550 m (u GOK), Daten nach Möller *et al.*, 2012). Stieg die CO_2 -Injektionsrate, so erhöhte sich neben dem Reservoirdruck auch der scheinbare spezifische elektrische Widerstand im Tiefenbereich der CO_2 -Injektion. In den Injektionspausen sank der Reservoirdruck langsam wieder ab, während auch die scheinbaren elektrischen Widerstände abnahmen.

Im weiteren zeitlichen Verlauf (Abb. 4.24) wurde annähernd kontinuierlich injiziert, wobei die erhöhte Injektionsrate bei rund 2,5 t/h lag. Sowohl der scheinbare elektrische Widerstand als auch der Reservoirdruck wiesen im Vergleich zu Abbildung 4.23 nur geringe zeitliche Schwankungen auf. Die Durchschnittswerte des scheinbaren elektrischen Widerstandes betrugen rund 0,4 Ωm .

Der jeweils zeitliche Verlauf der gemittelten scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstände in den beiden **Beobachtungsbohrungen Ktzi200 und Ktzi202** ist in Abbildung 4.25 und in Abbildung 4.26 jeweils zusammen mit den gemittelten Werten der Injektionsbohrung Ktzi201 (Daten aus Abb. 4.23 und Abb. 4.24) dargestellt. Der Reservoirdruck wurde lediglich in der Injektionsbohrung Ktzi201, nicht aber in den beiden Beobachtungsbohrungen gemessen. Der Reservoirdruck beeinflusste den Bohrlochkopfdruck (engl.: *wellhead pressure*). Er wurde an der Geländeoberkante in den beiden Beobachtungsbohrung gemessen. Somit konnten die gemessenen Werte des Bohrlochkopfdruckes (Daten aus Möller *et al.*, 2012) und die des Reservoirdruckes aus Ktzi201 für einen direkten Vergleich zusammen dargestellt werden. Ab dem 30.06.08 lagen die Widerstandswerte in allen drei Bohrungen bei rund 0,4 Ωm .

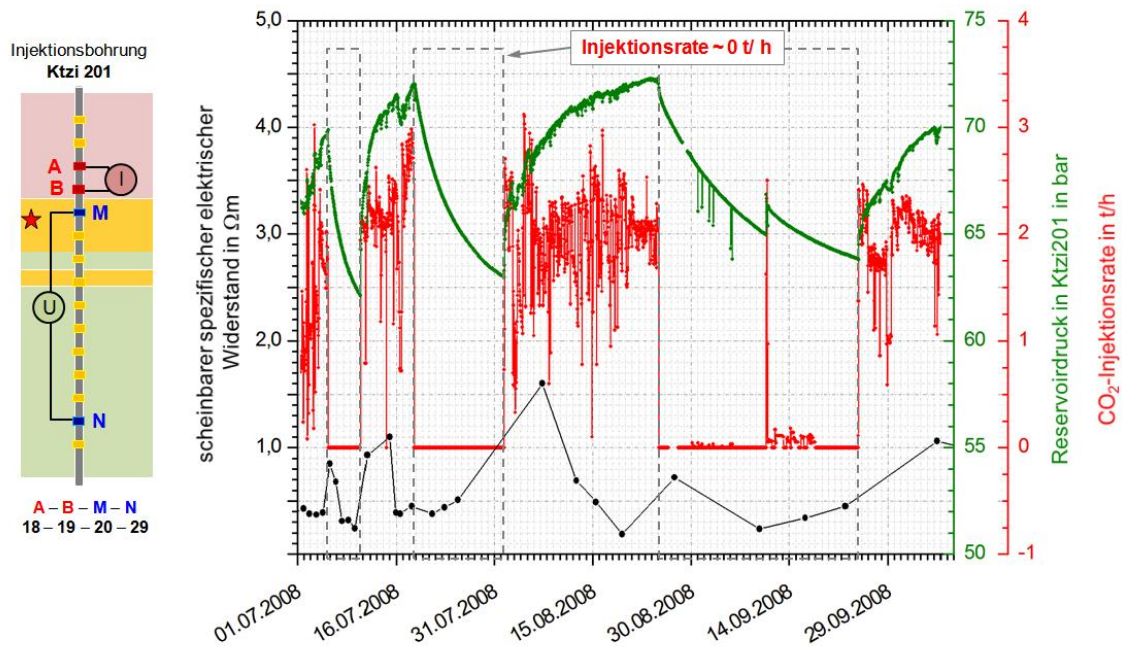


Abb. 4.23: Permanente Überwachung der CO₂-Injektion mit erhöhter Rate mit einer festen Dipol-Dipol-Anordnung (A, B, M, N: 18, 19, 20, 29) in der Injektionsbohrung Ktzi201. Der scheinbare spezifische elektrische Widerstand (schwarz) der festen Dipol-Dipol-Anordnung ist zusammen mit dem Reservoirdruck in Ktzi201 (grün) und der CO₂-Injektionsrate (rot) über der Zeit (01.07.08 bis 07.10.08) aufgetragen. Der rote Stern markiert den Ort der CO₂-Injektion in der Bohrung Ktzi201.

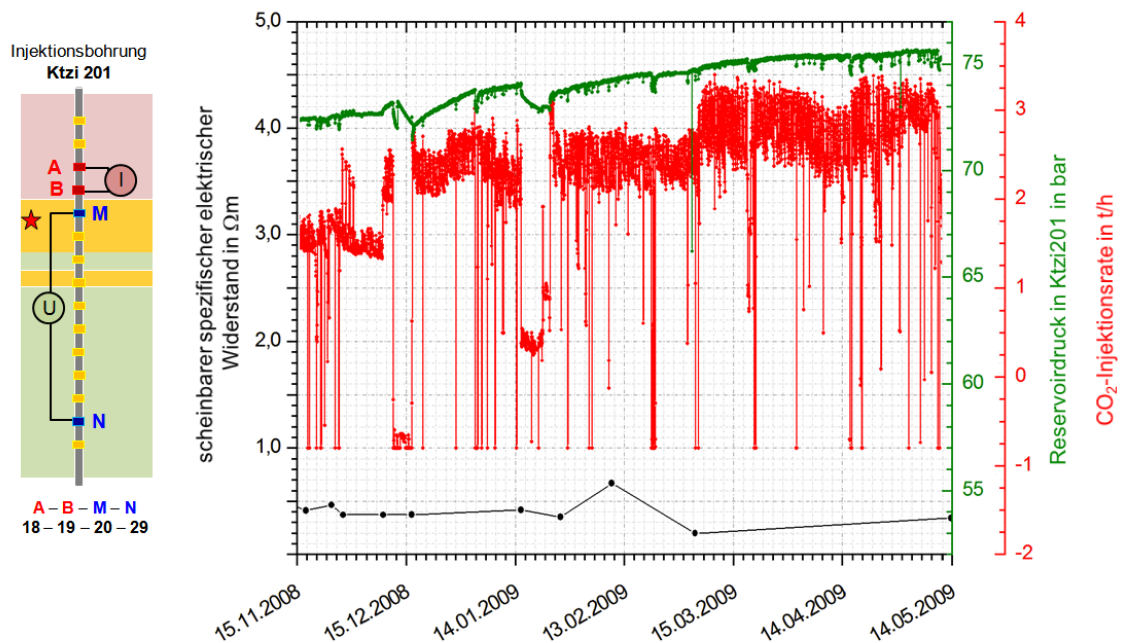


Abb. 4.24: Permanente Überwachung der CO₂-Injektion mit erhöhter Rate mit einer festen Dipol-Dipol-Anordnung (A, B, M, N: 18, 19, 20, 29) in der Injektionsbohrung Ktzi201. Der scheinbare spezifische elektrische Widerstand (schwarz) der festen Dipol-Dipol-Anordnung ist zusammen mit dem Reservoirdruck in Ktzi201 (grün) und der CO₂-Injektionsrate (rot) über der Zeit (15.11.08 bis 13.05.09) aufgetragen. Der rote Stern markiert den Ort der CO₂-Injektion in der Bohrung Ktzi201.

Im weiteren zeitlichen Verlauf traten in der Beobachtungsbohrung Ktzi200 lediglich geringfügige Schwankungen auf (Abb. 4.25). Erst ab Ende 01/2009 stiegen die Werte in der Beobachtungsbohrung Ktzi200 auf über 1 Ωm und erreichten 03/2009 ein Maximum von 3,2 Ωm (Abb. 4.26).

In der Beobachtungsbohrung Ktzi202 stieg der scheinbare elektrische Widerstand von rund 0,4 Ωm (09/2008) auf rund 2,4 Ωm (10/2008) analog zum zeitlichen Verlauf der Messwerte in der Injektionsbohrung Ktzi201 an (Abb. 4.25). Die Abhängigkeit der Widerstände von den Druckschwankungen im Reservoir und am Bohrlochkopf wird in Abbildung 4.27 deutlich (Zeitausschnitt aus Abb. 4.25). Anschließend schwankten die gemessenen Widerstände im Mittel um rund 2,2 Ωm . Sie erreichten 03/2009 ein Maximum von 35,9 Ωm (Abb. 4.26).

4.5.2.3 Interpretation und Diskussion

Mit der **festen Dipol-Dipol-Anordnung** (18, 19, 20, 29) in der Injektionsbohrung **Ktzi201** wurde der CO_2 -Injektionsprozess in der Injektionsbohrung Ktzi201 während der CO_2 -Injektion mit erhöhter Rate überwacht. Es ließ sich der zeitliche Verlauf der Widerstände mit der CO_2 -Injektionsrate und dem Reservoirdruck in der Injektionsbohrung Ktzi201 korrelieren. Das injizierte CO_2 erhöhte den Reservoirdruck im bohrlochnahen Bereich der Injektionsbohrung Ktzi201 und den elektrischen Widerstand im Tiefenbereich der CO_2 -Injektion. Der elektrische Widerstand stieg in den Injektionsphasen von rund 0,4 Ωm auf maximal 1,7 Ωm an (Abb. 4.23). Ähnlich große Widerstandsänderungen beobachteten Kummerow & Spangenberg (2011) im Labor unter in-situ Bedingungen an Sandsteinproben aus Ktzi202 während einer CO_2 -Injektion. In den Injektionspausen sanken die gemessenen Widerstände in Ktzi201 leicht zeitverzögert. Diese temporäre Widerstandsabnahme war mit nachströmendem elektrisch leitfähigem Formationswasser (rund 0,05 Ωm) erklärbar.

Die trotz höherer Injektionsrate geringen Schwankungen des Widerstandes ab dem 17.11.08 (Abb. 4.24) könnten mit der Kontinuität der CO_2 -Injektion und den daraus resultierenden stabilen Reservoirdrücken zusammenhängen. Im Zeitraum bis zum 06.10.08 (Abb. 4.23) bedingten die langen Injektionspausen Reservoirdruckänderungen von rund 9 bar, während die kurzzeitigen Unterbrechungen der Injektion ab dem 17.11.08 Reservoirdruckänderungen von lediglich bis zu 2 bar verursachten (Abb. 4.24). Diese kleinen Schwankungen konnten aufgrund der geringen Datendichte nicht aufgelöst werden.

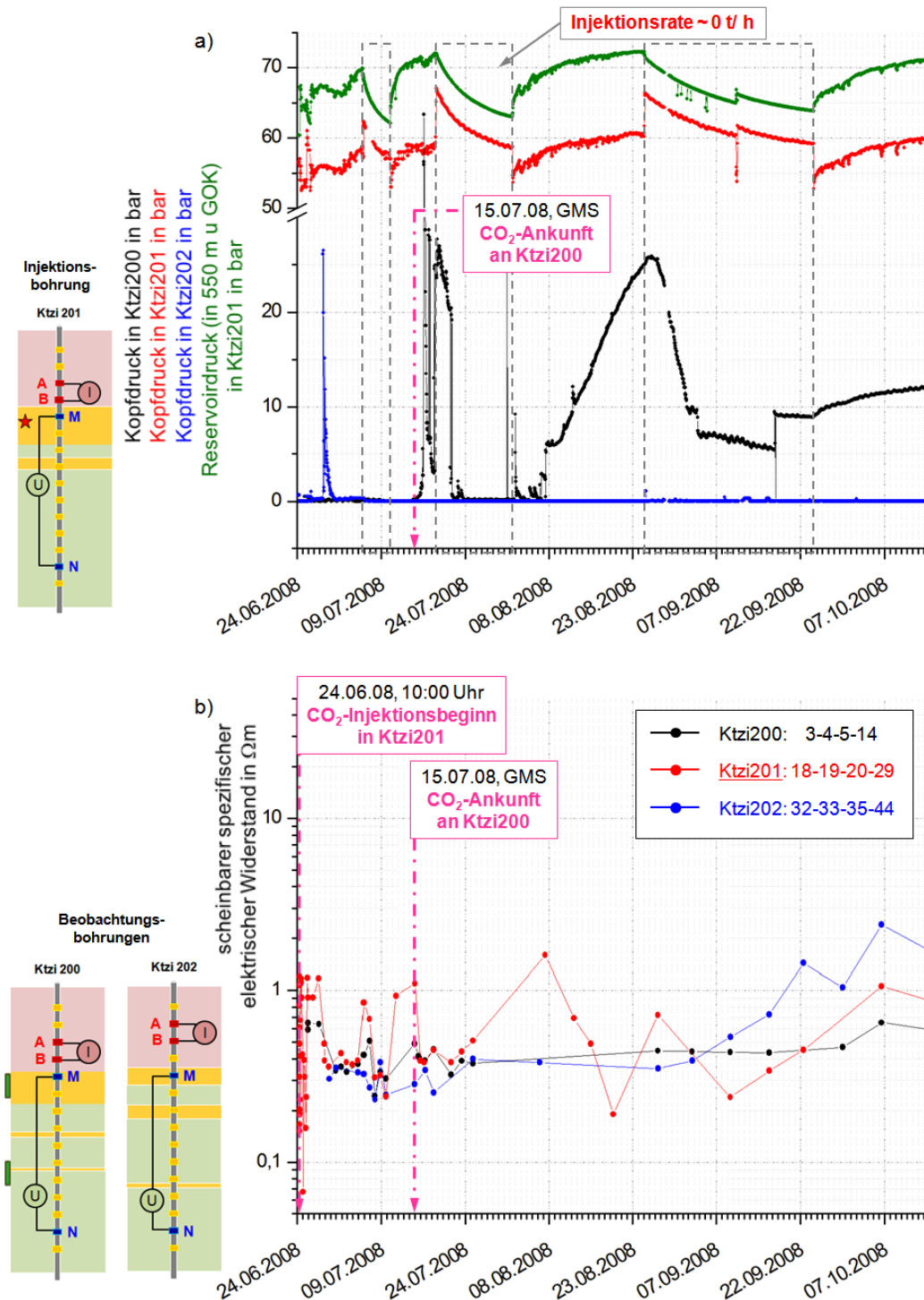


Abb. 4.25: Permanente Überwachung der CO₂-Injektion in der Injektionsbohrung Ktzi201 und der CO₂-Ankunft in den Beobachtungsbohrungen Ktzi200 und Ktzi202 mit jeweils einer festen Dipol-Dipol-Anordnung: (a) Der Reservoirdruck (in 550 m (u GOK)) in der Injektionsbohrung Ktzi201 (grün) ist zusammen mit dem Bohrlochkopfdruck (GOK) in Ktzi201 (rot) über der Zeit (24.06.08 bis 15.10.08) aufgetragen (Daten jeweils nach Möller *et al.*, 2012). Die scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstände der jeweils permanenten Anordnung in der Injektionsbohrung Ktzi201 (rot) und den beiden Beobachtungsbohrungen Ktzi200 (schwarz) und Ktzi202 (blau) sind über den selben Zeitraum in (b) dargestellt.

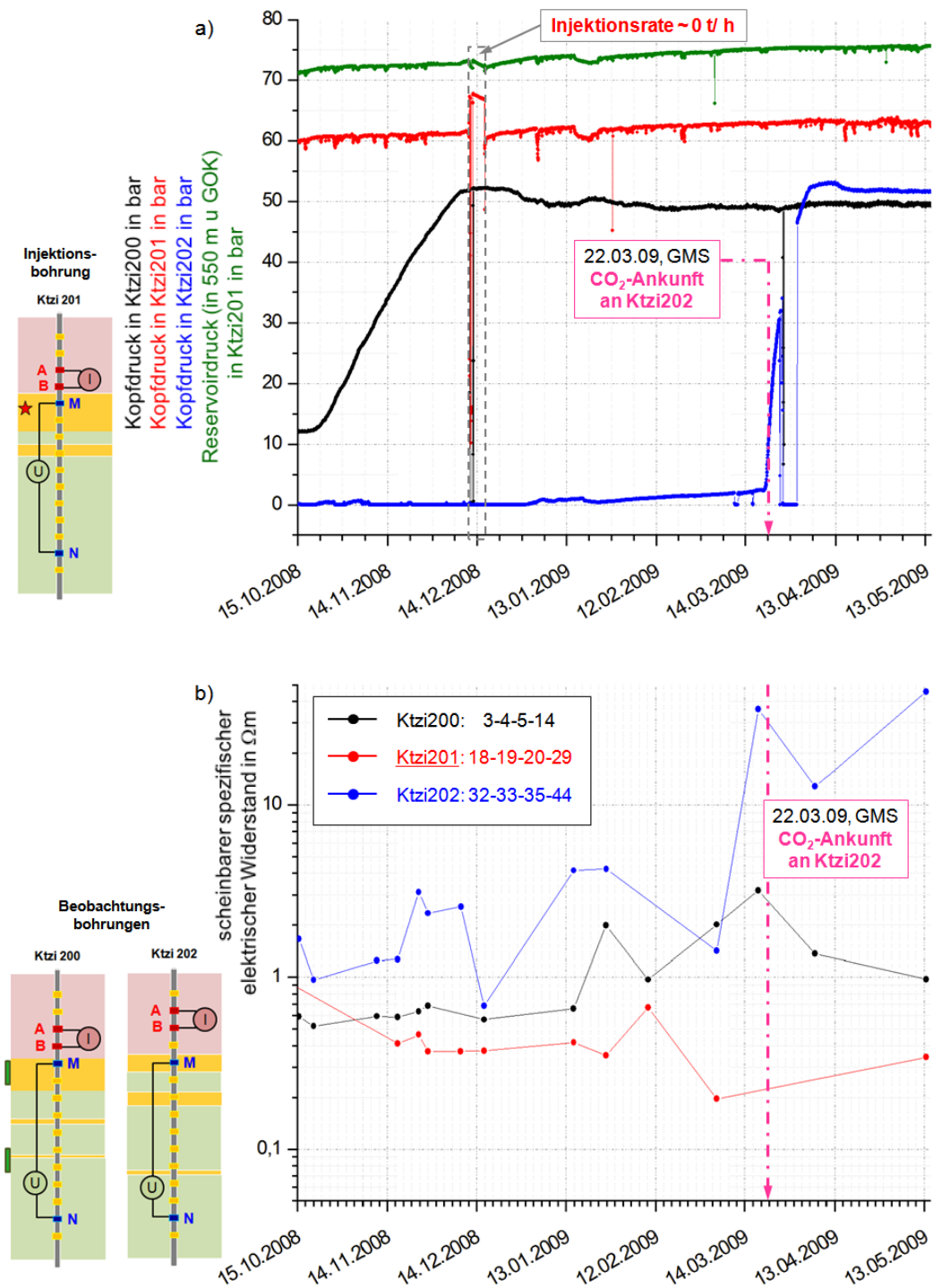


Abb. 4.26: Permanente Überwachung der CO₂-Injektion in der Injektionsbohrung Ktzi201 und der CO₂-Ankunft in den Beobachtungsbohrungen Ktzi200 und Ktzi202 mit jeweils einer festen Dipol-Dipol-Anordnung: (a) Der Reservoirdruck (in 550 m (u GOK)) in der Injektionsbohrung Ktzi201 (grün) ist zusammen mit dem Bohrlochkopfdruck (GOK) in Ktzi201 (rot) über der Zeit (15.10.08 bis 13.05.09) aufgetragen (Daten jeweils nach Möller *et al.*, 2012). Die scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstände der jeweils permanenten Anordnung in der Injektionsbohrung Ktzi201 (rot) und den beiden Beobachtungsbohrungen Ktzi200 (schwarz) und Ktzi202 (blau) sind über den selben Zeitraum in (b) dargestellt.

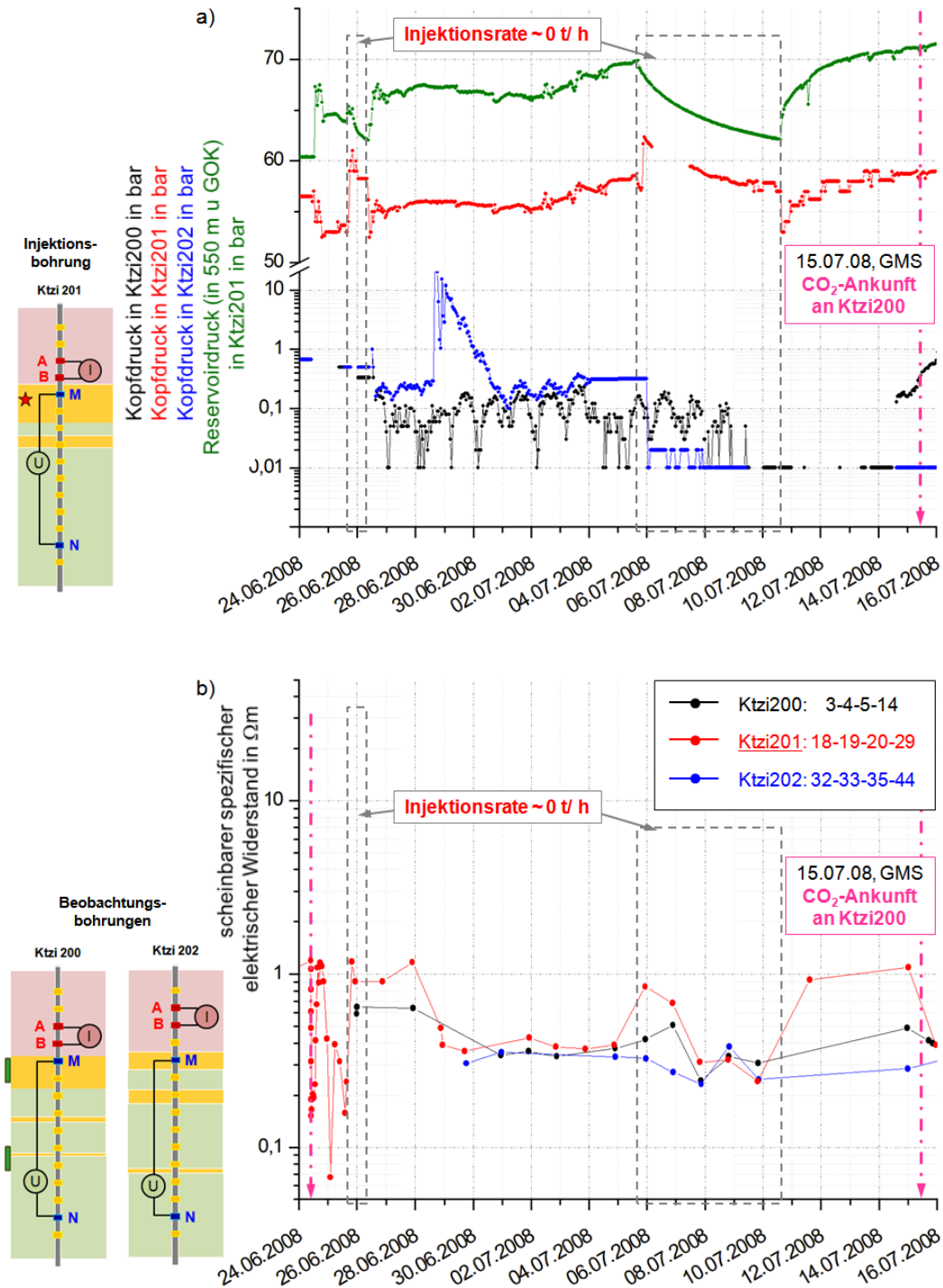


Abb. 4.27: Permanente Überwachung der CO_2 -Injektion in der Injektionsbohrung Ktzi201 und der CO_2 -Ankunft in den Beobachtungsbohrungen Ktzi200 und Ktzi202 mit jeweils einer festen Dipol-Dipol-Anordnung: (a) Der Reservoirdruck (in 550 m (u GOK)) in der Injektionsbohrung Ktzi201 (grün) ist zusammen mit dem Bohrlochkopfdruck (GOK) in Ktzi201 (rot) über der Zeit (24.06.08 bis 16.07.08) aufgetragen (Daten jeweils nach Möller *et al.*, 2012). Die scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstände der jeweils permanenten Anordnung in der Injektionsbohrung Ktzi201 (rot) und den beiden Beobachtungsbohrungen Ktzi200 (schwarz) und Ktzi202 (blau) sind über den selben Zeitraum in (b) dargestellt.

Die Messungen einer **festen Dipol-Dipol-Anordnung** in den **Beobachtungsbohrungen Ktzi200** (3, 4, 5, 14) und **Ktzi202** (32, 33, 35, 44) sollten jeweils die CO₂-Ankunft bestätigen. Die ab dem 05.07.08 in Ktzi200 steigenden und in Ktzi202 sinkenden Widerstände waren vermutlich auf Druckschwankungen im Reservoir zurückzuführen (Abb. 4.25). Genau ab diesem Zeitpunkt gab es eine Injektionspause, in der der Reservoirdruck im bohrlochnahen Bereich der Injektionsbohrung Ktzi201 sank. Leicht zeitverzögert sanken in Ktzi201, aufgrund des Nachströmens von leitfähigem Formationswasser, die scheinbaren elektrischen Widerstände. Eine ähnlich deutliche Widerstandsverringering war zu diesem Zeitpunkt (06.07.08) in Ktzi200 und Ktzi202 zu verzeichnen. Diese wurde in den beiden Beobachtungsbohrungen durch sinkende Bohrlochkopf- und damit auch durch sinkende Reservoirdrücke verursacht. Die in Abhängigkeit von der CO₂-Injektion in Ktzi201 verursachten Druckschwankungen in den beiden Beobachtungsbohrungen ließen eine Verbindung des Speicherreservoirs zwischen den Bohrungen Ktzi200, Ktzi201 und Ktzi202 vermuten.

Aus der zeitlichen Verteilung der mittels konstanter Dipol-Dipol-Anordnung gewonnen Widerstände konnte die durch GMS-Messungen nachgewiesene Ankunft des CO₂ (15.07.08) an der Beobachtungsbohrung Ktzi200 nicht anhand von signifikanten Widerstandserhöhungen nachgewiesen werden (Abb.4.25). Im Gegensatz dazu zeichnete sich die CO₂-Ankunft an der Beobachtungsbohrung Ktzi202 durch einen deutlichen Widerstandsanstieg um rund 30 Ω m ab (Abb.4.26). Die signifikante Widerstandszunahme in Ktzi202 im Vergleich zu Ktzi200 ist mit den Ergebnissen der elektrischen Ankopplungsmessungen übereinstimmend und mit unterschiedlichen Tongehalten erklärbar (Kap.4.5.1.3).

Abbildung 4.27 verdeutlicht die Abhängigkeit der elektrischen Widerstände von den Druckschwankungen im Reservoir und am Bohrlochkopf. Eine zunehmende CO₂-Injektionsrate erhöhte den Reservoirdruck im bohrlochnahen Bereich der Injektionsbohrung Ktzi201 und somit die scheinbaren Widerstände in der Tiefe des Reservoirs in Ktzi201 (06.07.08). Eine Erhöhung der Messwerte in Ktzi200 (07.07.08) ließ auch auf einen leicht zeitverzögerten Druckanstieg im bohrlochnahen Bereich der Beobachtungsbohrung Ktzi200 schließen, da zu diesem Zeitpunkt noch kein CO₂ die 50 m entfernte Beobachtungsbohrung erreicht haben konnte.

4.5.3 Geoelektrische Bohrloch-Bohrloch-Messungen in Ktzi200, Ktzi201 und Ktzi202

4.5.3.1 Versuchsaufbau und Datenakquisition

Im Zeitraum vom 30.06.08 bis 13.05.09 (Phase III) fanden zur Abbildung der räumlichen CO₂-Ausbreitung während der CO₂-Injektion mit erhöhter Rate **geoelektrische Messungen in Ktzi200, Ktzi201 und Ktzi202** statt. An Hand der so gewonnenen 3D-Widerstandsverteilung sollte der zeitliche Fortschritt der CO₂-Injektion in das Speichergestein aufgezeigt und die CO₂-Ankunft an den beiden Beobachtungsbohrungen bestimmt werden.

Die geoelektrischen Messungen in allen drei Bohrungen bestanden jeweils aus klassischen Anordnungen wie Dipol-Dipol, Wenner-Alpha und Wenner-Gamma, und aus Variationen dieser Anordnungen mit veränderter Elektrodenauslagenlänge sowie Platzierungen der Stromelektroden in unterschiedlichen Bohrungen (siehe Kap. 2.1.3).

Für einen der über 50 aufgenommenen Datensätze wurden durchschnittlich mehr als 4.000 Datenpunkte gemessen. Die Messzeit betrug dabei bis zu 4 Stunden. Bei den Messungen variierte die Anzahl der gemessenen Datenpunkte geringfügig. Es konnten aber im Durchschnitt jeweils mehr als 2.000 Messwerte für die Inversion genutzt werden. Den größten Anteil der entfernten Messwerte hatten die Messungen mit beteiligten nicht funktionsfähigen Elektroden 11, 39 bis 45 (Kap. 4.7). Ebenfalls wurden Messungen mit injizierten Strömen unter 15 mA sowie Daten mit Standardabweichungen über 35 % (zur Steigerung der Datenqualität) vor der Inversion eliminiert. Für die 3D-Inversion wurde der Open-Source Programmcode BERT genutzt (Kap. 2.1.4). Die wichtigsten gewählten Inversionsparameter sind in Tabelle A.9 zusammengefasst. Die genauen Daten (Datum, Uhrzeit, Injektionsraten, Datenpunkte) der ausgewählten geoelektrischen Messungen in allen drei Bohrungen aus Phase II und III sind in Tabelle A.8 zusammengefasst.

4.5.3.2 Ergebnisse

Ausgewählte Inversionsergebnisse der **geoelektrischen Messungen in Ktzi200, Ktzi201 und Ktzi202** sind in Abbildung 4.28 und Abbildung 4.29 zusammengefasst. In Abbildung 4.28 sind die spezifischen elektrischen Widerstände anhand der jeweiligen 2D-Vertikalschnitte zwischen der Injektionsbohrung Ktzi201 und der Beobachtungsbohrung Ktzi200 während der Phase III dargestellt (05.08.08, 19.08.08, 29.09.08, 06.10.08, 24.11.08, 08.12.08, 09.02.09 und 06.04.09). Zum besseren Vergleich ist das

Inversionsergebnis der Nullmessung am 17./ 18.06.2008, sowie das der Messung während der Phase II (29.06.08) mit abgebildet (Kap. 4.4.3.2).

Das Ergebnis der Nullmessung zeigte eine leitfähige Schicht von rund $0,5 \Omega\text{m}$, die von zwei hochohmigeren Bereichen (rund $1 - 2 \Omega\text{m}$) umschlossen war (Kap. 4.4.3). Mit fortschreitender CO_2 -Injektion stieg der spezifische elektrische Widerstand ausgehend von der Injektionsbohrung Ktzi201 in der Injektionstiefe deutlich an. Die Widerstandszunahme trat jedoch nicht nur innerhalb der Sandsteinschichten auf, sondern auch deutlich oberhalb des CO_2 -Injektionspunktes (an den Elektrode 16 bis 19). Mit fortschreitender CO_2 -Injektion stiegen die spezifischen elektrischen Widerstände auch im Umfeld der Beobachtungsbohrung Ktzi200 auf über $4 \Omega\text{m}$. Des Weiteren zeigten sich hochohmige Anomalien im Bereich der unteren Elektroden 28 bis 30 in der Injektionsbohrung Ktzi201. Die Ergebnisse der Messungen vom 09.02.09 und 06.04.09 zeigten elektrische Widerstände, die zwar deutlich über den zu Beginn von Phase III gemessenen Werten lagen, jedoch geringer als die zuvor beobachteten Widerstände (08.12.08) waren.

Die Ergebnisse in Abbildung 4.29 zeigen den CO_2 -Injektionsfortschritt anhand der jeweiligen 2D-Vertikalschnitte zwischen den beiden Beobachtungsbohrungen Ktzi200 und Ktzi202 während der Phase III (24.11.08, 08.12.08, 09.02.09 und 06.04.09). Zum besseren Vergleich ist ebenfalls das Inversionsergebnis der Nullmessung am 17./ 18.06.2008 mit dargestellt. Da die CO_2 -Front erst die nahegelegene Beobachtungsbohrung Ktzi200 (50 m von der Injektionsbohrung entfernt) und dann die weiter entfernte Beobachtungsbohrung Ktzi202 (112 m entfernt) erreichte, werden in Abbildung 4.29 die Ergebnisse erst ab dem 24.11.08 dargestellt. Bis zu diesem Zeitpunkt reproduzieren die Ergebnisse die Nullmessung.

Abgesehen von einer leichten Widerstandserhöhung im Bereich der unteren Elektroden beider Beobachtungsbohrungen, waren 2008 keine signifikanten Widerstandsänderungen in den 2D-Vertikalschnitten messbar. Ab 02/2009 war eine deutliche Zunahme des spezifischen elektrischen Widerstandes innerhalb des Reservoirs, insbesondere im bohrlochnahen Bereich der Beobachtungsbohrung Ktzi202 erkennbar. 04/2009 zeigten die Ergebnisse eine geringe Widerstands-abnahme im Reservoir. Aufgrund der eliminierten Messdaten mit beteiligten Elektroden 39 bis 45 lagen keine Informationen zum untersten Tiefenbereich in Ktzi202 vor.

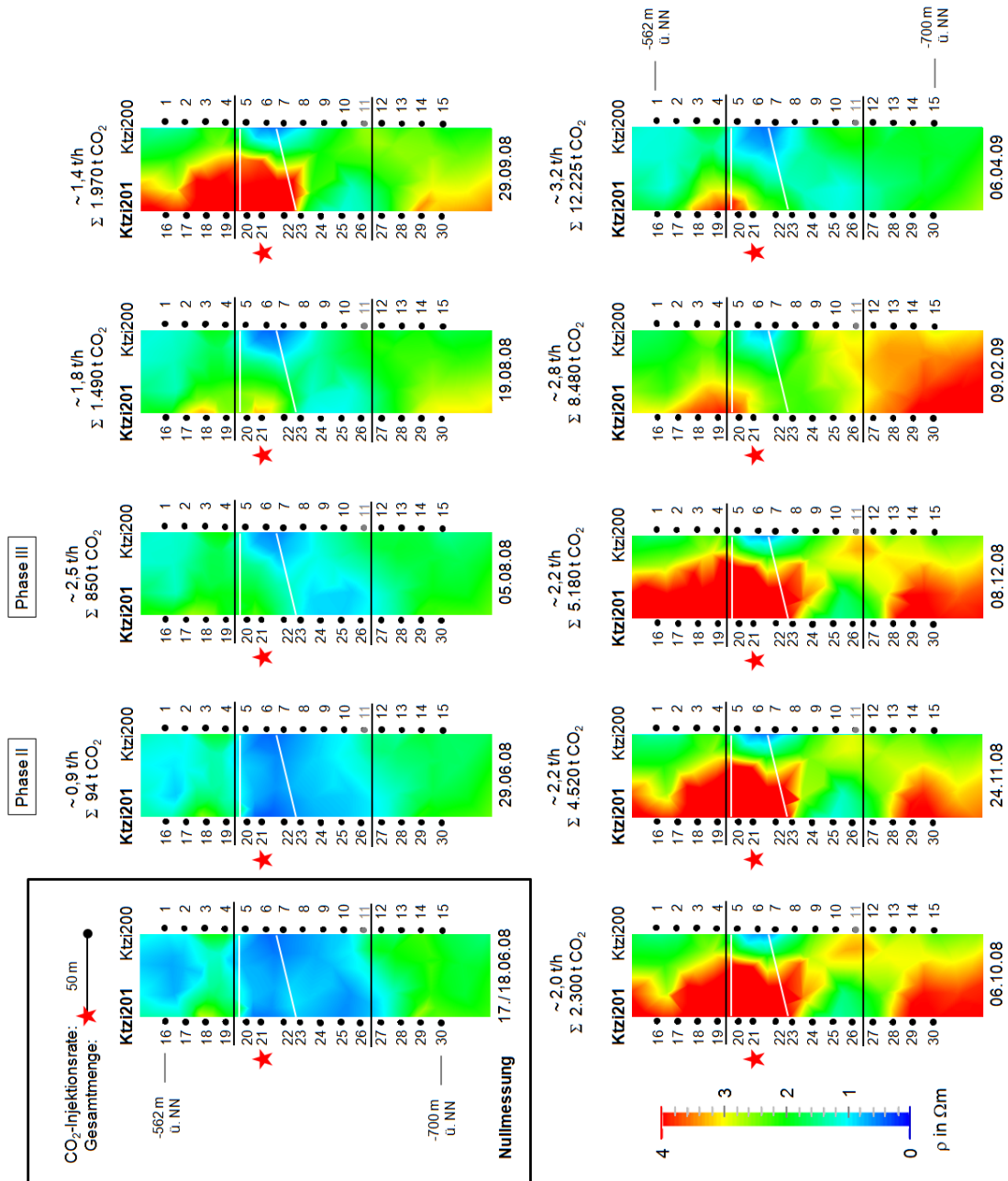


Abb. 4.28: Farbcodierte Darstellung der spezifischen elektrischen Widerstände als Inversionsergebnis der Nullmessung am 17./18.06.2008, sowie als Inversionsergebnisse der ausgewählten Messungen während der Phase II (29.06.08) und der Phase III (05.08.08, 19.08.08, 29.09.08, 06.10.08, 24.11.08, 08.12.08, 09.02.09 und 06.04.09). Es ist jeweils der Vertikalschnitt zwischen der Injektionsbohrung Ktzi201 und der nahegelegenen Beobachtungsbohrung Ktzi200 dargestellt. Der rote Stern markiert den Ort der CO₂-Injektion in der Bohrung Ktzi201. Die schwarze Markierung kennzeichnet die Stuttgart-Formation, während die weiße Markierung die schematische Tiefenlage der Sandsteinschichten darstellt.

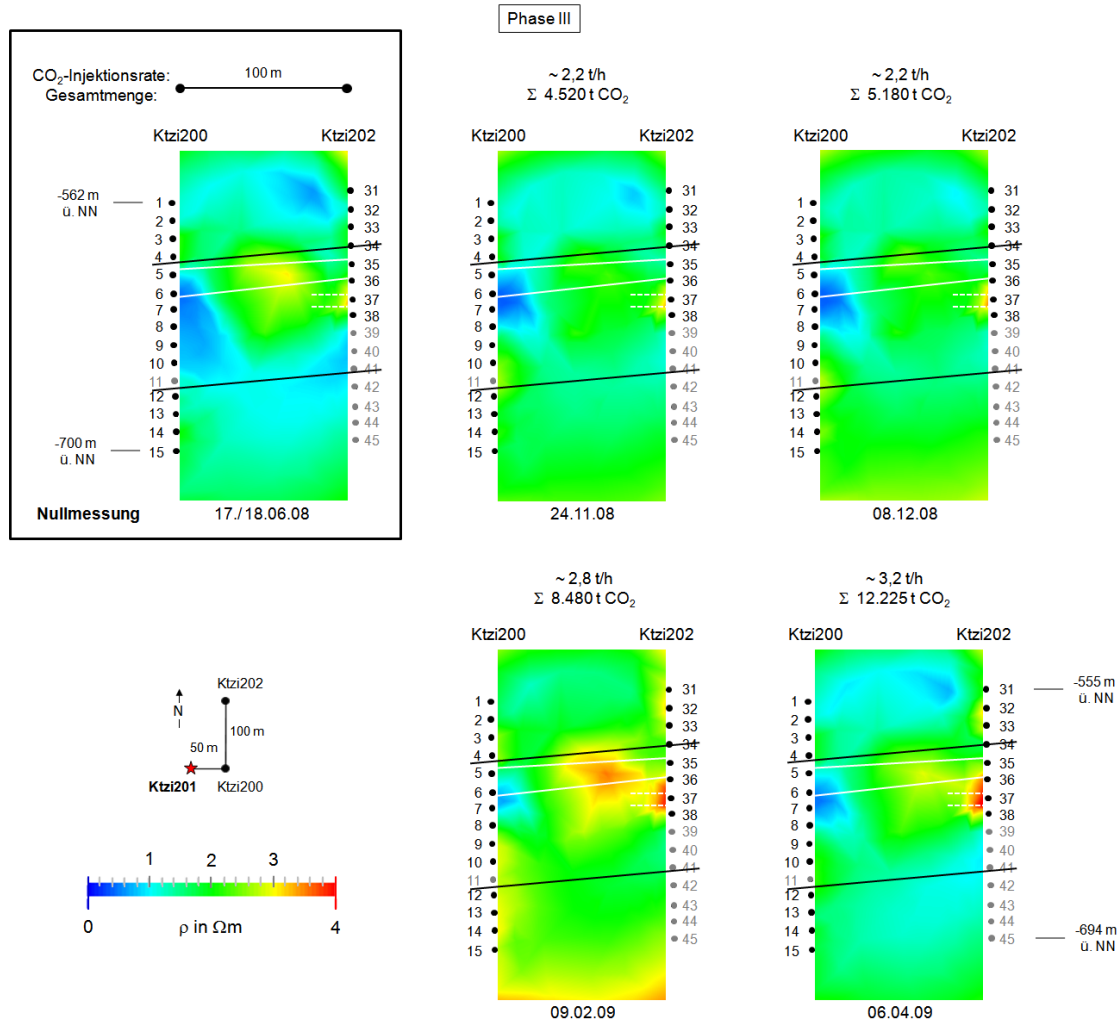


Abb. 4.29: Farbcodierte Darstellung der spezifischen elektrischen Widerstände als Inversionsergebnis der Nullmessung am 17./ 18.06.2008, sowie als Inversionsergebnisse der ausgewählten Messungen während der Phase III (24.11.08, 08.12.08, 09.02.09 und 06.04.09). Es ist jeweils der Vertikalschnitt zwischen den beiden Beobachtungsbohrungen Ktzi200 und Ktzi202 dargestellt. Der rote Stern markiert den Ort der CO₂-Injektion in der Bohrung Ktzi201. Die schwarze Markierung kennzeichnet die Stuttgart-Formation, während die weiße Markierung die schematische Tiefenlage der Sandsteinschichten darstellt. Die weiß gestrichelten Linien deuten die Tiefenlage der zweiten ebenfalls geringmächtigeren Sandsteinschicht in Ktzi202 an.

4.5.3.3 Interpretation und Diskussion

Die ausgewählten Inversionsergebnisse der **geoelektrischen Messungen in Ktzi200, Ktzi201 und Ktzi202** aus der Phase III mit erhöhter Injektionsrate beschreiben die CO₂-Ausbreitung ins Reservoir (Abb. 4.28, 4.29). Die kontinuierliche Widerstandserhöhung nahe dem Injektionspunkt (Abb. 4.28) war auf die fortschreitende CO₂-Injektion zurückzuführen. Mit zunehmender CO₂-Injektionsmenge und CO₂-Injektionsrate in Phase III breitete sich das injizierte CO₂ auch mit einer höheren Geschwindigkeit von bis

zu 2,3 m/ Tag (Kempka & Kühn, 2013) im Reservoir aus. Somit war der Einfluss des injizierten CO₂ auf den Reservoirwiderstand ab der Messung 08/2008 in den **Inversionsergebnissen zwischen der Injektionsbohrung Ktzi201 und der Beobachtungsbohrung Ktzi200** messbar. Die CO₂-Gesamtmenge betrug zu diesem Zeitpunkt bereits rund 850 t. Eine deutliche Erhöhung des Reservoirwiderstandes trat ab Ende 09/2008 auf und hielt bis Anfang 2009 an. Durch diese sich räumlich ausdehnende hochohmige Anomalie konnte der CO₂-Injektionsfortschritt abgebildet werden.

Die Widerstandsabnahme im Reservoir in den beiden Messungen vom 09.02.09 und 06.04.09 (Abb. 4.28) ließ sich mit dem Lösen von CO₂ im Formationswasser erklären. Xue *et al.* (2009) zeigten in ihren Labor- und Feldexperimenten, dass sich mit der Zeit auch im Formationswasser gelöstes CO₂ anhand von Widerstandsverringerungen detektieren ließ. Die Ursache der hochohmigen Anomalien im Bereich der unteren Elektroden 28 bis 30 in der Injektionsbohrung Ktzi201 (19.08.08 bis 09.02.09) konnte nicht abschließend geklärt werden. Es könnte sich um Randeffekte bei der Inversion handeln, während ein CO₂-Einfluss ausgeschlossen wurde.

Die Widerstandserhöhung im Bereich oberhalb des Injektionspunktes ließ sich mit der CO₂-Ausbreitung im unzementierten Ringraum erklären. Das CO₂ stieg nach oben und sorgt für eine schlechte Ankopplung der Elektroden an die Bohrlochumgebung (Kap. 4.5.1). Diese verschlechterten Ankopplungsbedingungen führten zu erhöhten Widerständen in den unzementierten Bereichen oberhalb des Reservoirs. Die PNG-Daten (CO₂-Sättigungsbestimmungen mit dem Puls-Neutron-Gamma-Verfahren) bestätigten den CO₂-Aufstieg im Ringraum (Bergmann *et al.*, 2012).

Zwischen der Injektionsbohrung Ktzi201 und der Beobachtungsbohrung Ktzi200 konnte eine gute Auflösung erzielt werden, da zum einen die Entfernung der beiden Bohrungen zueinander lediglich 50 m betrug, während die laterale Auflösung der Bohrlochelektrodenanordnung mit rund 30 m (siehe Kapitel 2.1.2) abgeschätzt wurde, und zum anderen, weil die angetroffenen Sandsteine mit 16 bis 18 m (Norden, 2007a, b, c) deutlich mächtiger waren als die vertikale Auflösung der Bohrlochelektrodenanordnung von rund 5 m.

Während sich die Form, die Größe und die ungefähre Lage des injizierten CO₂ gut auflösen ließen, konnten dünne Ausbreitungspfade nicht detektiert werden. Das hatte zur Folge, dass nicht alle Bereiche der CO₂-Fahne vollständig aufgelöst und abgebildet werden konnten. Kleinere Migrationspfade im Reservoir konnten nicht erfasst werden. Die CO₂-Ankunft an der Beobachtungsbohrung Ktzi200 ließ sich anhand der Inversionsergebnisse somit nicht genau bestimmen. Gaskonzentrationsmessungen in

der Bohrung Ktzi200 konnten die CO₂-Ankunft am 15.07.08 nach einer Injektionsmenge von 531 t CO₂ (Schilling *et al.*, 2009) nachweisen.

Abbildung 4.29 zeigt die **Inversionsergebnisse zwischen den beiden Beobachtungsbohrungen Ktzi200 und Ktzi202**. Während die elektrischen Widerstände in der Umgebung der Bohrung Ktzi200 relativ konstant und unverändert zur Nullmessung blieben, konnten in der Bohrung Ktzi202 ab der Messung vom 09.02.09 erhöhte Widerstände im Reservoir aufgrund der CO₂-Injektion beobachtet werden. Da sich die CO₂-Fahne in alle Richtungen um die Injektionsbohrung Ktzi201 ausbreitete, erreichte sie die Inversionsschnittebene zwischen den beiden Beobachtungsbohrungen eher als die 112 m entfernten Bohrung Ktzi202. Somit konnte die CO₂-Ausbreitung zwischen den Bohrungen Ktzi200 und Ktzi202 bereits 02/2009 (rund 8.500 t CO₂ injiziert) abgebildet werden. Die genaue Ankunft an der Beobachtungsbohrung Ktzi202 ließ sich mit den geoelektrischen Messungen in allen drei Bohrungen aufgrund der geringen zeitlichen Datendichte nicht bestimmen. Gaskonzentrationsmessungen in dieser Bohrung bestätigten die CO₂-Ankunft nach rund 11.000 t injiziertem CO₂ am 22.03.09 (Zimmer *et al.*, 2011b), acht Monate nach der Ankunft an der Bohrung Ktzi200.

Die Widerstandserhöhung zeichnete sich in der weiter entfernten Bohrung Ktzi202 deutlicher ab als in der Bohrung Ktzi200 (Abb. 4.29). Dies war auf unterschiedliche Tongehalte der Sandsteine zurückzuführen. Im Tiefenbereich des Sandsteinreservoirs waren in Ktzi200 vorwiegend tonhaltige Sandsteine vorhanden, während in der Beobachtungsbohrung Ktzi202 vorwiegend Feinsandstein mit geringem Tonanteil angetroffen wurden (Norden, 2007a, c). Dass hohe Tongehalte im Sandstein zu deutlich geringeren Widerstandserhöhungen bei der CO₂-Injektion führten als niedrigere Tongehalte, haben Nakatsuka *et al.* (2010) an Sandsteinproben vom CO₂-Speicherstandort Nagaoka im Labor nachgewiesen. Somit wurde vermutet, dass der höhere Tongehalt in Ktzi200 zu geringeren Widerstandserhöhungen bei der CO₂-Injektion führte als in Ktzi202. Die Beobachtung der über die Grenzen des Sandsteinbereichs deutlich hinausgehenden Widerstandserhöhung, war auf das durch die gering mächtigen Sandsteinschichten in Ktzi202 (rund 9 m, siehe auch Abb. 4.8) bedingte mangelnde Auflösungsvermögen der Messungen zurückzuführen (siehe Kap. 2.1.2).

4.5.4 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse von Phase III

In Phase III wurde die **CO₂-Injektion mit erhöhter Rate** (30.06.08 - 13.05.09) erfolgreich überwacht. Es wurden geoelektrische Verfahren angewandt, die im Rahmen dieser Arbeit für diese Problemstellung angepasst wurden.

Durchgeführte **elektrische Ankopplungsmessungen** in allen drei Bohrungen ergaben in CO₂-unbeeinflussten Tiefen Ankopplungswiderstände von durchschnittlich rund 75 Ω . Die Erhöhung der Ankopplungswiderstände zwischen den oberen Elektroden 17 -18, 18 - 19 und 19 - 20 (durchschnittlich 210 Ω) im bohrlochnahen Bereich der Injektionsbohrung Ktzi201 wurde durch die CO₂-Injektion mit erhöhter Rate verursacht. Das injizierte CO₂ stieg im unzementierten Ringraum der Bohrung auf und führte auch an den Elektroden oberhalb der Sandsteinschicht zu einer Widerstandserhöhung. Ab Anfang 08/2008 traten zusätzlich auch zwischen den Elektroden 20 - 21 und 21 - 22 sehr hohe Ankopplungswiderstände (durchschnittlich rund 4.000 Ω) auf. Ab Mitte 08/2008 wurden zwischen den Elektroden 17 - 18 durchschnittliche Ankopplungswiderstände von rund 115 Ω , zwischen 18 -19 Werte von rund 160 Ω , zwischen 19 - 20, 20 - 21 und 21 - 22 Werte von durchschnittlich rund 3.900 Ω gemessen. Der Anstieg der Ankopplungswiderstände an den Elektroden nahe dem Injektionspunkt in Ktzi201 ist auf die erhöhte CO₂-Injektionsrate und -menge zurückzuführen.

In der Beobachtungsbohrung Ktzi200 waren zwischen den Elektroden 3 - 4, 4 - 5 und 5 - 6 erhöhte Ankopplungswiderstände aufgrund der CO₂-Ankunft zu verzeichnen. In der Beobachtungsbohrung Ktzi202 traten ab der Messung vom 18.03.09 erhöhte Ankopplungswiderstände (170 bis 300 Ω) zwischen den Elektroden 31 - 32, 32 - 33 und 33 -34, sowie ab der Messung vom 06.04.09 zusätzlich zwischen den Elektroden 34 - 35 und während der Zusatzmessung vom 21.03.12 auch zwischen den Elektroden 35 - 36 auf. Die CO₂-Ankunft an den beiden Beobachtungsbohrungen wurde somit anhand von Widerstandserhöhungen im Tiefenbereich des Sandsteinreservoirs gemessen.

Aufgrund der ebenfalls unzementierten oberen Bereiche in der Beobachtungsbohrung Ktzi202 stieg auch dort das CO₂ im Ringraum auf und führte neben einer Erhöhung der elektrischen Ankopplungswiderstände an den Elektroden im Speicherhorizont auch zu Widerstandserhöhungen an Elektroden oberhalb der Sandsteinschichten.

Die Widerstandserhöhung zeichnete sich dabei in der weiter entfernten Beobachtungsbohrung Ktzi202 deutlicher ab als in der näher liegenden Beobachtungsbohrung Ktzi200. Eine mögliche Ursache hierfür könnte der

unterschiedliche Tongehalt in der Speicherformation sein. Nakatsuka *et al.* (2010) konnten an Sandsteinproben vom CO₂-Speicherstandort Nagaoka im Labor nachweisen, dass hohe Tongehalte im Sandstein zu deutlich geringeren Widerstandserhöhungen bei der CO₂-Injektion führten als niedrigere Tongehalte. Im Tiefenbereich des Sandsteinreservoirs waren in Ketzin in der Beobachtungsbohrung Ktzi200 vorwiegend Tonsteine vorhanden, während in der Beobachtungsbohrung Ktzi202 vorwiegend Feinsandstein angetroffen wurden (Norden, 2007a, c). Da Porosität und Permeabilität der Sandsteine beider Bohrungen sehr ähnlich waren, wurde vermutet, dass der höhere Tongehalt in Ktzi200 die Ursache der im Vergleich zu Ktzi202 geringeren Widerstandserhöhungen bei der CO₂-Injektion war.

Breen *et al.* (2012) fanden mittels Laborexperimenten an Proben vom CO₂-Standort Cranfield (USA) einen Zusammenhang zwischen der Größe des Ankopplungswiderstandes und dem Auftreten von Korrosionserscheinungen an den Bohrlochelektroden. In Ketzin konnten die gemessenen Erhöhungen der Ankopplungswiderstände (bis 13.05.09) ausnahmslos in der Injektionsbohrung Ktzi201 mit der CO₂-Injektion selbst und in den beiden Beobachtungsbohrungen Ktzi200 und Ktzi202 mit der CO₂-Ankunft in Verbindung gebracht werden. Es traten geringe Ankopplungswiderstände an den Elektroden 11 und 39 auf. Sie ließen sich mit dem Eintritt der salinen Fluide des Reservoirs in das Messkabel und der damit verbundenen Kurzschlussmessung erklären. Weitere Untersuchungen zur langfristigen Elektrodenausfall sind in Kapitel 4.7 dargelegt.

Der zeitliche Verlauf der gemessenen Ankopplungswiderstände zwischen den benachbarten Elektroden ohne CO₂-Einfluss wurde in allen drei Bohrungen als stabil beschrieben. Der mit zunehmender Elektrodentiefe steigende Ankopplungswiderstand zwischen den benachbarten Elektroden war auf die zunehmende Kabellänge zurückzuführen.

Die durchgeführten **geoelektrischen Bohrloch-Bohrloch-Messungen mit einer festen Dipol-Dipol-Anordnung in jeweils einer Bohrung** sollten die Abhängigkeit der gemessenen elektrischen Widerstände vom Reservoirdruck und von der CO₂-Injektionsrate untersuchen.

Die Messkurve für die **Injektionsbohrung Ktzi201** mit der Elektrodenanordnung 18, 19, 20, 29 zeigte, dass die gemessenen Widerstände mit der CO₂-Injektionsrate und dem Reservoirdruck korrelieren. Das injizierte CO₂ erhöhte den Reservoirdruck im bohrlochnahen Bereich der Injektionsbohrung Ktzi201 um rund 9 bar und somit die

gemessenen Widerstände im Tiefenbereich der CO₂-Injektion. In den Injektionspausen sanken die Messwerte leicht zeitverzögert von über 1 Ωm auf rund 0,3 Ωm ab. Diese temporäre Widerstandsabnahme war jeweils mit nachströmendem elektrisch leitfähigem Formationswasser (rund 0,05 Ωm) erklärbar. Die gemessenen Widerstände stimmten gut mit den Ergebnissen aus den Laborexperimenten von Kummerow & Spangenberg (2011) überein. Sie untersuchten Sandsteinproben aus Ktzi202 unter in-situ Bedingungen und konnten Erhöhungen des elektrischen Widerstandes von rund 0,5 Ωm auf 1,7 Ωm während einer CO₂-Injektion beobachten.

Ab Mitte 12/2008 wurde das CO₂ kontinuierlich und ohne größere Injektionspausen mit höherer Rate injiziert. Sie bedingte stabile Reservoirdrücke und somit geringe Schwankungen in den gemessenen scheinbaren elektrischen Widerständen.

Die Messungen der festen Dipol-Dipol-Anordnung in den **Beobachtungsbohrungen Ktzi200** (3, 4, 5, 14) und **Ktzi202** (32, 33, 35, 44) ergaben jeweils eine Erhöhung der scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstände im bohrlochnahen Bereich mit der CO₂-Ankunft an den beiden Beobachtungsbohrungen. Allerdings konnte anhand dieser Widerstandserhöhung nicht eindeutig auf die CO₂-Ankunft an der jeweiligen Beobachtungsbohrung geschlossen werden, da die Werte von den Druckschwankungen im Reservoir und somit auch von den Druckschwankungen am Bohrlochkopf beeinflusst waren. In den Injektionspausen sanken die gemessenen scheinbaren Widerstände auch in beiden Beobachtungsbohrungen leicht zeitverzögert ab. Diese temporäre Widerstandsabnahme in Ktzi201 konnte mit nachströmendem elektrisch leitfähigem Formationswasser erklärt werden. In den beiden Beobachtungsbohrungen war diese Fluidbewegung mit sinkenden Bohrlochkopf- und demnach mit abnehmenden Reservoirdrücken verbunden.

Die Inversionsergebnisse der **geoelektrischen Messungen in Ktzi200, Ktzi201 und Ktzi202** bildeten den Fortschritt der CO₂-Injektion in die leitfähige Sandsteinschicht (rund 0,5 Ωm) in der Tiefe der Stuttgart-Formation zwischen der Injektionsbohrung Ktzi201 und der naheliegenden Beobachtungsbohrung Ktzi200 anhand einer Widerstandserhöhung ab. Allerdings konnten kleine CO₂-Injektionsmengen und Injektionen mit geringen Raten (wie in Phase II) nicht aufgelöst werden. Es wurden kleinere Migrationspfade nicht erfasst und somit nicht alle Bereiche der CO₂-Fahne vollständig aufgelöst und abgebildet. Bereiche zwischen den Bohrungen ließen sich besser abbilden, je höher die CO₂-Injektionsrate war und je kontinuierlicher das CO₂ injiziert wurde. Die CO₂-Ankunft an den beiden Beobachtungsbohrungen Ktzi200 und Ktzi202 ließ sich anhand der Inversionsergebnisse nicht eindeutig bestimmen. Es wurde

gezeigt, dass das mit der Zeit in Lösung gehende CO₂ zu einer messbaren Widerstandsabnahme führte. Außerdem wurde vermutet, dass die tonhaltigen Sandsteine in Ktzi200 zu geringeren Widerstandserhöhungen bei der CO₂-Ausbreitung führen als die Feinsandsteine in Ktzi202.

Als Gesamtfazit wird festgehalten, dass mittels geoelektrischer Messungen in allen drei Bohrungen die geologische CO₂-Speicherung im Sandsteinreservoir erfolgreich abgebildet werden konnte. Es konnte die Lage und die Ausbreitung im Reservoir aufgezeigt werden. Elektrische Ankopplungsmessungen bestimmten anhand von Widerstandserhöhungen im Tiefenbereich des Sandsteinreservoirs die CO₂-Ankunft an den beiden Beobachtungsbohrungen. Damit ist die zentrale wissenschaftliche Fragestellung im Untersuchungsprogramm am Pilotstandort Ketzin und somit dieser Arbeit, inwieweit geoelektrische Verfahren im Bohrloch zur Überwachung der CO₂-Speicherung eingesetzt werden können, bestätigend geklärt. Wie gut die CO₂-Ausbreitung im Vergleich zu anderen physikalischen, chemischen und mikrobiologischen Monitoring-Methoden abgebildet werden konnte, wird abschließend in Kapitel 5.5 diskutiert.

4.6 Diskussion zur Eignung der Bohrlochmessanordnung

Einen direkten Einfluss auf die Messbedingungen der geoelektrischen Messungen im Bohrloch haben

- die räumliche Anordnung der drei Bohrungen zueinander, sowie
- die Anordnung der installierten Elektroden innerhalb der drei Bohrungen.

Beides wird deshalb an dieser Stelle betrachtet und diskutiert.

Die **Lage der drei Bohrungen** zueinander wurde unter Berücksichtigung der erwarteten geologischen Verhältnisse, der angestrebten CO₂-Injektionsmenge, sowie der physikalischen Grenzen der räumlichen Auflösung aller geplanter Monitoringmethoden entworfen (Kap. 3.2.1).

Vordergründig führt die ursprünglich geplante Lage der Injektionsbohrung im rechten Winkel der Dreiecksanordnung der Bohrungen zu einem größeren Beobachtungsraum als die in Ketzin letztendlich umgesetzte Positionierung. Aufgrund der angenommenen Schichtaufwölbung in grob geschätzt nördlicher bis westlicher Richtung, war mit einer prinzipiellen CO₂-Ausbreitung innerhalb des Reservoirs in diese Richtung zu rechnen. Voraussetzung dabei war, dass die durchbohrten

Speicherschichten des Reservoirs miteinander verbunden sind. Bohrungen nördlich und westlich der Injektionsbohrung boten sich somit zur Beobachtung an.

Aus technischen Gründen musste die im Westen der Anordnung liegende Bohrung kurzfristig zur Injektionsbohrung ausgebaut werden (Kap. 4.1). Der Vorteil der Geoelektrik bestand trotz der Nutzungsänderung darin, dass auch in der Injektionsbohrung selbst Elektroden permanent installiert und Messungen durchgeführt werden konnten. Im Gegensatz dazu konnten die seismischen Sensoren aus Platzgründen von vornherein ausschließlich im Inneren der beiden Beobachtungsbohrungen mit erhöhtem Messaufwand, aufgrund des risikoreichen Ein- und Ausfahrens, verwendet werden. Eine gute Option nach der Nutzungsänderung der Injektionsbohrung blieb damit die geoelektrische Überwachung der CO₂-Ausbreitung kombiniert an der Erdoberfläche und in den Bohrungen (Kap. 5). Der Beobachtungsraum der geoelektrischen Bohrlochmessungen wurde mit der realisierten Lage der drei Bohrungen zueinander nicht grundlegend verringert.

Bei unbekannter CO₂-Ausbreitungsrichtung eignete sich die am CO₂-Speicherstandort Ketzin gewählte Bohrlochanordnung dennoch besser als beispielsweise eine Linienanordnung der drei Bohrungen wie am CO₂-Speicherstandort Cranfield (Kap. 2.3.3.3).

Das **Vertikalelektrodensystem** wurde unter Berücksichtigung der elektrischen Eigenschaften im Speicheraquifer vor und während der CO₂-Injektionsphase anhand von Numerischen Vorwärtsmodellierungen für die geoelektrische Überwachung der CO₂-Speicherung in Ketzin entworfen (u.a. nach Christensen *et al.*, 2006; Ramirez *et al.*, 2003). Die Anzahl der Bohrlochelektroden, ihre Positionierung in den drei Bohrungen und ihr Abstand zueinander war letztendlich ein geeigneter Kompromiss aus CO₂-Auflösungsvermögen, Kosten und Nutzen (Giese *et al.*, 2009). Die Anwendbarkeit der geoelektrischen Verfahren in Ketzin wurde ausführlich im Kapitel 4.1 beschrieben.

Der CO₂-Speicherstandort Ketzin verfügte im Gegensatz zum CO₂-Speicherstandort Cranfield (insgesamt 21 Elektroden) über insgesamt 45 permanent installierte Elektroden. Neben den beiden Beobachtungsbohrungen wurde auch die Injektionsbohrung mit jeweils 15 Bohrlochelektroden ausgestattet. Dadurch konnte auch der Nahbereich um die Injektionsbohrung geoelektrisch überwacht werden. Im Vergleich dazu wurden am CO₂-Speicherstandort Cranfield die Elektroden lediglich in den beiden Beobachtungsbohrungen, nicht aber in der Injektionsbohrung selbst, installiert.

Die nach dem Abteufen der Bohrungen vorliegende Speichermächtigkeit lag deutlich unter der Schichtdicke, die auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse (gute bis sehr gute Speichereigenschaften) aus den Altbohrungen im Umfeld der Ketzin-

Bohrungen prognostiziert wurde (Kap. 3.2.4). Für die geoelektrischen Messungen in Ketzin bedeuteten die geringeren Schichtmächtigkeiten bei gleicher Messanordnung eine schlechtere Auflösung der CO₂-Ausbreitung in folglich dünnere Schichten. Eine Anpassung der Elektrodenabstände an die tatsächliche Speichermächtigkeit würde prinzipiell das Auflösungsvermögen der Bohrlochmessanordnung erhöhen. Bei einer geringen Schichtmächtigkeit wäre eine Verringerung der Elektrodenabstände innerhalb der Bohrung besonders in Reservoirnähe von Vorteil gewesen. Wobei eine größere **Elektrodenanzahl** in Reservoirnähe generell zu einer verbesserten Auflösung und einem größeren Beobachtungsraum führt. Aus technischen Gründen musste der Aufbau des Vertikalelektrodensystems mit den Elektrodenabständen jedoch bereits vor dem Niederbringen der drei Bohrungen geplant werden. Da die genaue Tiefenlage der Speicherschicht zu diesem Zeitpunkt nicht bekannt war, wurden äquidistante Elektrodenabstände geplant und bei der Fertigung berücksichtigt. Eine nachträgliche Anpassung einer größeren Elektrodenanzahl in der Reservoirtiefe war in Ketzin nicht möglich.

Neben dem CO₂-Speicherhorizont sollte der angrenzende Caprock (Deckschichten über dem Reservoir) und die darunterliegende Schichten überwacht werden. Aus der begrenzt zur Verfügung stehenden Elektrodenanzahl resultierten somit größere **Elektrodenabstände** von 10 m als sie beispielsweise am CO₂-Speicherstandort Cranfield realisiert werden konnten (4,5 m bzw. 9 m). Christensen *et al.* (2006) empfehlen auf Grundlage ihrer Modellierungen eine Länge der Elektrodenauslage in der Bohrung von mindestens der Größe des Abstandes der Bohrungen zueinander. In Ketzin wurde das mit einer Elektrodenauslage von 140 m in jedem Bohrloch bei Abständen der Bohrungen zueinander von 50 m, 100 m und 112 m umgesetzt. Nach Beendigung der geoelektrischen Messungen in Ketzin entwickelten Wagner *et al.* (2015a) einen Algorithmus zur Bestimmung der optimalen Elektrodenanordnung mit optimalen Elektrodenabständen für die drei Bohrungen. Für den homogenen Mehrschicht-Fall lässt sich mithilfe von symmetrisch angeordneten Elektroden mit geringeren Elektrodenabständen (1 m) sowohl im Reservoir als im Gestein oberhalb- und unterhalb (Elektrodenabstände 2,5 m) ein höheres Auflösungsvermögen erzielen, als es mit äquidistanten Elektrodenabständen von 10 m möglich ist. Mangels vor Bohrbeginn vorliegender zuverlässiger a priori Informationen hinsichtlich der Lage der Sandsteinschichten und ihrer Schichtdicken sind in Ketzin nach Wagner *et al.* (2015a) äquidistante Elektrodenabstände zweckmäßig und empfohlen. Nach Rücker & Günther (2011) gelten die Bohrlochelektroden in Ketzin aufgrund ihrer Form, ihrer Abmaße und ihrer Abstände innerhalb einer Bohrung als ideale Punktquelle.

Die Genauigkeit der Messwerte hängt von einer exakten Bestimmung der **Elektrodenkoordinaten** im Bohrloch ab. Bohrungen zeigen immer eine gewisse Richtungsabweichung zur Vertikalen.

Zur Bestimmung der exakten relativen Tiefen der Elektroden in allen drei Bohrungen wurden während des Einbaus nichtleitende Maßbänder an den Verrohrungen mitgeführt und mit in jedes Bohrloch eingebaut. Die Elektrodentiefen konnten anhand der bekannten Tiefen der Rohrverschraubungen verifiziert werden. Die Elektrodentiefen ließen sich auf den Zentimeter genau bestimmen. Ablesefehler am Maßband während der Elektroden- und somit auch während der Maßbandinstallation gelten als vernachlässigbar (Kap. 4.2.1).

Ist der Bohrlochverlauf bekannt, können die Koordinaten leicht aus der relativen Tiefenlage (d.h. aus dem Abstand zwischen den Elektroden entlang der isolierten Verrohrung) errechnet werden. Dafür ist eine vollständige Bestimmung der Bohrlochabweichung ab der Geländeoberkante bis in die Tiefe unerlässlich. Aufgrund von oberflächennahen Bohrlochinstabilitäten konnte in allen drei Bohrungen im obersten Bohrabschnitt keine Abweichungsmessungen durchgeführt werden. Der Verlauf wurde abgeschätzt. Das bedeutete, dass damit die Genauigkeit der Messwerte abnahm. Die Bohrlochabweichungen der drei Bohrungen betrugen in der jeweiligen Endteufe für die Injektionsbohrung Ktzi201 7,24 m (810 m (u GOK)), für die Beobachtungsbohrung Ktzi200 lediglich 0,49 m (755 m (u GOK)) und für die Beobachtungsbohrung Ktzi202 4,83 m (750 m (u GOK)). Für die Elektroden ergaben sich Tiefenabweichungen von bis zu zwei Metern. Wird die Bohrlochabweichung bei der Datenauswertung nicht berücksichtigt, ergeben sich Geometriefehler (Kap. 4.4.3). Sie entstehen aufgrund der Abweichung der wahren Position der Vertikalelektroden von den theoretischen Elektrodenpositionen (vereinfachte Koordinaten, siehe Labitzke *et al.*, 2012). Den größten Einfluss auf die Abbildungsqualität in Elektrodennähe hat dabei laut Wagner *et al.* (2015b) die Bohrlochabweichung in z-Richtung. Um die Elektrodenkoordinaten anhand von Bohrlochabweichungsmessungen bereits ab der Geländeoberkante für zukünftige Messungen exakt zu bestimmen, sind somit stabile Bohrungen zwingend erforderlich.

Eine durchgehendere **Zementation** der Bohrlochelektroden verbessert die Ankopplung der Sensoren ans umliegende Gestein. Damit verbessert sich die Genauigkeit der Messwerte. In Ketzin wurden alle drei Bohrungen mit Filterrohren und Schlitzern zur Injektion ausgestattet. Dies hatte Vor- und Nachteile. Einerseits konnten jede der drei Bohrungen als Injektionsbohrung genutzt werden. So konnte mit geringem Zeitverlust und geringen Kosten eine Ausweichbohrung für die Injektion genutzt werden. Dies

erwies sich im Nachhinein als sehr nützlich. Andererseits brachte der gleiche technische Ausbau aller Bohrungen von vornherein den Nachteil mit sich, dass Elektroden nicht vollständig zementiert werden konnten. Das bedeutete, dass die geoelektrischen Messungen von vornherein ungenauer und schwieriger umzusetzen waren.

In der Beobachtungsbohrung Ktzi200 waren die Elektroden 1 bis 4, sowie die Elektroden 7 bis 10 von kompaktem Zement, die Elektroden 5 und 6 von nicht kompaktem Zement, die Elektrode 11 von weichem, tonigem Material und die Elektroden 12 bis 15 vom salinen Formationswasser (offenes Bohrloch) umgeben (Rinke, 2007a). Feuchte Tone (wie in tiefen Bohrungen anzunehmen) führten bei elektrischen Ankopplungsmessungen zu geringen Werten. Ankopplungsmessungen mit beteiligter Elektrode 11 brachten Werte von rund $55\ \Omega$. Allerdings ließen Werte in dieser Größenordnung aufgrund von Kurzschlussmessungen auf den Kabelwiderstand selbst schließen. In der Injektionsbohrung Ktzi201 befanden sich die Elektroden 16 bis 19 im Tiefenbereich des viskosen Trennpuffers (Abdichtung), die Elektroden 20 bis 23 im salinen Formationsfluid (offenes Bohrloch), die Elektrode 24 in der Bohrspülung und die Elektroden 25 bis 30 im Zement (Rinke, 2007b). In der Beobachtungsbohrung Ktzi202 waren die Elektroden 31 bis 38 vom salinen Formationsfluid (offenes Bohrloch) umschlossen, während die Elektroden 39 bis 45 vom Zement umgeben waren (Rinke, 2007c), wobei die Elektrode 39 genau im Grenzbereich lag. Ankopplungsmessungen mit dieser beteiligten Elektrode brachten Werte von rund $58\ \Omega$. Die Funktionsfähigkeit der Elektroden wird im folgenden Kapitel zusammengefasst und analysiert.

Unzementierte Elektroden konnten während des Speicherprozesses vom injizierten CO_2 umschlossen werden. Dieses Trockenfallen führte zum Verlust der elektrischen Ankopplung ans Gestein. Dieser Effekt lieferte sehr hohe Ankopplungswiderstände und diente als direkter Anzeiger der injizierten Gase. Speziell in der Beobachtungsbohrung Ktzi202 stieg das ankommende CO_2 im Bohrlochringraum bis zum zementierten Bereich (oberhalb der installierten Elektroden) auf und führte somit zu Widerstandsanomalien außerhalb des Speicherhorizontes (Kap. 4.5.1).

Es ließen sich folgende **Maßnahmen zur Optimierung** der Ausgangsbedingungen für geoelektrische Messungen ableiten. Sie würden zu einer genaueren Abbildung der CO_2 -Speicherung am Standort Ketzin führen.

Eine sternförmige Anordnung von mindestens fünf Beobachtungsbohrungen um die Injektionsbohrung würde den geoelektrischen Beobachtungsraum vergrößern. Die Anordnung wäre somit unabhängig von der Ausbreitungsrichtung des Speichergases im tiefen Untergrund.

Ein Vertikalelektrodensystem mit einer höheren Elektrodenanzahl pro Bohrung und mit deutlich geringeren Elektrodenabständen und besonders im Speicherhorizont einer höheren Elektrodendichte im Vergleich zu den darüber- und darunter liegenden Schichten würde das Abbildungsvermögen der geoelektrischen Messungen verbessern. Wagner *et al.* (2015a) erreichten in ihren Modellierungen mithilfe einer dichten Elektrodenanordnung im Reservoir ein höheres Auflösungsvermögen im Speicherhorizont. Die Centralizer könnten dabei als zusätzliche Elektroden genutzt werden. Auf eine robustere Kabelisolierung und verstärkte Verbindung zur Elektrode sollte geachtet werden, um Kabelbeschädigungen vorzubeugen.

Zur Minimierung der Abbildungsfehler, die besonders durch den Einfluss hochleitfähiger Füllmaterialien im Bohrlochringraum verursacht werden, empfahlen Wagner *et al.* (2015b) auf der Grundlage der Untersuchungen von Doetsch *et al.* (2010) die Berücksichtigung des Ringraumes bei der Dateninversion (engl.: *borehole constrained inversion*).

Die vorgestellten geoelektrischen Messungen mit der Apparatur GeoTom wurden als Ergänzung der geoelektrischen Messungen mit der Apparatur GDP-32 geplant. Es sollten zwei verschiedene Messgeräte eingesetzt werden. Aufgrund technischer Geräteprobleme konnten mit der Apparatur GDP-32 erst unmittelbar nach der CO₂-Testinjektion am 20.06.08 geoelektrische Messungen durchgeführt werden. Die Ergebnisse der CO₂-Injektion mit geringer Rate (der GDP-32) sind ausschließlich in Kießling *et al.* (2010b) und die Ergebnisse der CO₂-Injektion mit erhöhter Rate zusätzlich in Schmidt-Hattenberger *et al.* (2011, 2012, 2013); Martens *et al.* (2012); Bergmann *et al.* (2016a) beschrieben.

Trotz der bedeutend geringeren Stromstärke von maximal 100 mA (GPD-32: max. 3 A), sowie der aufgenommenen diskreten Messwerte (GDP-32: kontinuierliche Messwertaufnahme) und der längeren Messzeit (GeoTom: 8 Kanäle; GDP-32: 15 Kanäle) konnten mit der Messapparatur GeoTom gute Messwerte erzielt und der CO₂-Injektionsfortschritt hinreichend gut abgebildet werden. Dennoch empfiehlt sich immer ein schnelleres Messgerät, das auch höhere Ströme in den Untergrund injiziert, somit größere Potentialunterschiede misst und folglich Messwerte mit geringeren Messfehlern gewinnt. Eine kontinuierliche Aufnahme der gemessenen Spannungs- und Stromzeitreihen ermöglicht ein individuelles Preprocessing (siehe Schmidt-Hattenberger *et al.*, 2012). Es liefert dementsprechend ein noch genaueres Abbild der CO₂-Injektion.

Retrospektiv betrachtet lässt sich zusammenfassen, dass die Bohrlochmessanordnung am Pilotstandort Ketzin für die geoelektrische Überwachung der CO₂-Speicherung

prinzipiell geeignet ist, aber aufgrund der angetroffenen geringeren Schichtmächtigkeiten durchaus optimierungswürdig bleibt.

4.7 Diskussion zur Funktionsfähigkeit der Bohrlochelektroden

Für geoelektrische Messungen waren funktionsfähige Bohrlochelektroden und ihre gute Ankopplung an die Umgebung im Bohrloch erforderlich. Die Funktionsfähigkeit der Bohrlochelektroden war nicht selbstverständlich. Die Elektroden in Ketzin befanden sich fest installiert in mehreren hundert Metern Tiefe im Bohrloch und waren von Bohrlochzement, Tonen oder im ungünstigsten Fall von Formationswässern mit hohem Salzgehalt umgeben. Die Elektroden konnten somit weder gewartet noch bei auffälligem Verhalten repariert werden. Deshalb wurde in Phase I der Anschluss der Elektroden ans Messkabel und ihre Wirkung als Punkt-Elektrodensystem überprüft (Kap. 4.2) sowie in den Phasen I, II und III ihre Ankopplung an den geologischen Untergrund gemessen (Kap. 4.2 und Kap. 4.4).

Es werden nun die möglichen Ursachen nicht funktionsfähiger Elektroden erläutert und anschließend die Funktionsfähigkeit der Elektroden in Ketzin diskutiert.

Zeitliche Änderungen der gemessenen Ankopplungswiderstände können verschiedene Ursachen haben:

- Die Bohrlochelektroden haben **keine elektrische Ankopplung** an das umliegende Gestein. Das ist der Fall, sobald Gase sie umgeben. CO₂ ist solch ein Gas. Gase verhindern einen elektrischen Stromfluss zwischen Elektrode und Gestein. Somit treten sehr hohe elektrische Ankopplungswiderstände auf.
- Die Edelstahlelektroden befinden sich im ungünstigsten Fall im Formationswasser hoher Salinität. An den Elektrodenoberflächen können bedingt **elektrochemische Reaktionen** auftreten. Dabei entsteht ein Reaktionsprodukt, das die Elektroden von der Umgebung elektrisch isoliert. Dieser chemische Vorgang wird allgemein als Korrosion bezeichnet. Elektroden mit Korrosionserscheinungen liefern zunehmend erhöhte elektrische Ankopplungswiderstände. Bei der Interpretation der Messwerte ist demnach Vorsicht geboten.
- Das **Bohrlochmesskabel ist beschädigt**. Durch Risse im Kabelmantel kann das sehr leitfähige Formationswasser ins Kabelinnere eindringen. Folglich kommt es dort zum elektrischen Kurzschluss zwischen den Einzelleitungen.

Somit werden elektrische Ankopplungswiderstände in der Größenordnung des Kabelwiderstandes gemessen. Elektroden mit beschädigtem Messkabel liefern keine Messwerte und sind unbrauchbar.

In Ketzin wurden verschiedene Gase zur Injektivitätssteigerung und als Präventionsmaßnahme, sowie Markierungsgase und das Speichergas CO₂ in das Sandstein-Reservoir injiziert. Das bedeutete, dass Elektroden im Sandstein von den injizierten Gasen umschlossen und somit vom Untergrund elektrisch isoliert werden konnten.

Im Feldexperiment in Ketzin wurden Elektroden aus Edelstahl genutzt. Breen *et al.* (2012) führten Laborexperimente zur Bewertung geoelektrischer Messungen bei der Überwachung der CO₂-Speicherung durch. Sie konnten an materialgleichen Elektroden Korrosion nachweisen. Das bedeutete, dass mit der Nutzung von Elektroden aus Edelstahl nachweislich das Risiko bestand, dass in Ketzin ebenfalls Korrosion auftreten könnte. Einen Zusammenhang zwischen den Korrosionserscheinungen und der geoelektrischen Nutzung der Elektroden, also ob beispielsweise der elektrische Stromfluss die Korrosion förderte, konnte von Breen *et al.* (2012) im Labor nicht nachgewiesen werden. Die Laborelektroden befanden sich in Versuchskammern mit salzwassergesättigten Sanden und wurden den geologischen Bedingungen, wie sie am CO₂-Speicherstandort Cranfield vorlagen, nachempfunden. Sowohl in Cranfield, als auch in Ketzin bestand der Speicherhorizont aus Sandsteinen, gefüllt mit Formationswässern (elektrische Leitfähigkeit σ von rund 17 S/m bzw. 20 S/m).

Alternativ zu Edelstahlelektroden könnten prinzipiell Grafitelektroden (Langmanson, 2004) verwendet werden, um Korrosionsvorgänge an den Bohrlochelektroden zu vermeiden. Sie kamen in Ketzin aufgrund der viel höheren Materialkosten nicht zum Einsatz. Die Edelstahlelektroden überzeugten in Ketzin besonders beim Einbau aufgrund ihrer größeren Stabilität. Desweiteren gab es bereits Erfahrungen mit Edelstahlelektroden im tiefen Untergrund, sowie entsprechende Zulassungen für den Einbau in Bohrlöchern.

Während die durchgeführten elektrischen Ankopplungsmessungen in Ketzin keinen Hinweis auf ein durchtrenntes Messkabel und damit auf eine Kabelbeschädigung während des Einbaus brachten, konnten Beschädigungen des Kabelmantels nicht ausgeschlossen werden. Durch Risse im Kabelmantel bestand die Möglichkeit, dass Formationsfluide ins Kabelinnere eindringen und dort zum elektrischen Kurzschluss zwischen den Einzelleitungen führten.

Zusammenfassung der Ergebnisse der Ankopplungsmessungen in Ketzin und Diskussion der Funktionsfähigkeit der Elektroden:

- Die **Elektrode 21** (Ktzi201) zeigte während der CO₂-Injektion sehr hohe Ankopplungswiderstände von bis zu 4.000 Ω. Das ließ sich durch eine sehr schlechte Ankopplung der Elektrode an das Gestein erklären. Das CO₂ wurde durch die zwei Filterstrecken (644,88 - 649,07 m und 650,02 - 654,21 m (u GOK)) des oberen Filterrohres in die Speicherformation injiziert. Das CO₂ stieg aufgrund seiner geringeren Dichte gegenüber der des Formationswassers im Reservoir auf und sammelte sich unterhalb der undurchlässigen Deckschicht (Caprock) im oberen Reservoirbereich. Das CO₂ umgab bei seinem Aufstieg zuerst die auf dem Filterrohr angeklebte Elektrode 21 (644,10 m (u GOK)) und verhinderte durch seine geringe elektrische Leitfähigkeit jegliche Ankopplung zur Formation. Die Widerstandserhöhung an der Elektrode 21 ließ sich folglich mit der unmittelbaren Nähe zum CO₂-Injektionspunkt erklären. Die unterhalb des Injektionspunktes installierte Elektrode 22 (655,35 m (u GOK)) war von der Widerstandserhöhung durch das injizierte und aufsteigende CO₂ nicht betroffen.
- Die gemessenen Widerstandserhöhungen an den **Elektroden 18, 19 und 20** in der Injektionsbohrung Ktzi201 von durchschnittlich rund 75 Ω auf rund 90 bis 210 Ω konnten mit der Injektion und dem Aufstieg von CO₂ und anderen Gasen im Reservoir zum Deckgebirge (633 m (u GOK)) erklärt werden. Während die Elektrode 20 und 21 innerhalb der Sandsteinabfolgen lagen, befanden sich die Elektroden 16 bis 19 im viskosen Trennpuffer. Das CO₂ stieg im Ringraum der Bohrung, aufgrund der unzementierten Bereiche, bis zur Elektrode 18 auf. CO₂-Sättigungsbestimmungen im Bohrloch bestätigten diese Ausbreitung (Bergmann *et al.*, 2012).
- Die gemessenen Widerstandserhöhungen in den beiden Beobachtungsbohrungen Ktzi200 (**Elektroden 4 und 5**) und Ktzi202 (**Elektrode 35**) von durchschnittlich rund 75 Ω auf rund 77 bis 300 Ω konnten mit der CO₂-Ankunft erklärt werden. Da die Elektroden in der Beobachtungsbohrung Ktzi202 im Bereich des Caprock nicht zementiert wurden und sich somit im offenen Bohrloch befanden, stieg das dort ankommende CO₂ im Ringraum auf und führte zusätzlich an den **Elektroden 31 bis 34** zu Widerstandserhöhungen.
- An den **Elektroden 11** (Ktzi200) und **39** (Ktzi202) wurden sehr geringe Widerstandswerte von rund 52 bis 58 Ω gemessen. Das deutete darauf hin, dass

saline Fluide des Reservoirs in das (vermutlich beschädigte) Messkabel eingedrungen waren und folglich zu einem elektrischen Kurzschluss zwischen den Einzelleitungen führten. Auch an den **Elektroden 40 bis 45** wurden sehr niedrige Werte von rund $65\ \Omega$ in der Größenordnung des Kabelwiderstandes gemessen. Der Kabelwiderstand hing von der Kabellänge ab und somit jeweils von der Elektrodentiefe. Für die Elektrode 1 (Ktzi200) betrug der Kabelwiderstand somit rund $50\ \Omega$, während er für die Elektrode 45 (Ktzi202) bei rund $63\ \Omega$ lag (Krüger, persönliche Mitteilungen, 2013). Innerhalb einer Bohrung unterschieden sich die Kabelwiderstände jeweils zwischen der obersten und untersten Elektrode um rund $10\ \Omega$ (Hin- und Rückmessung). Zur Vermeidung von Kabelbeschädigungen musste deshalb besonders viel Wert auf eine dichte Isolierung der Bohrlochmesskabel und deren Verbindung zur Elektrode sowie auf ein robustes Material des Kabelmantels gelegt werden.

Zusammenfassend wird darauf hingewiesen, dass von den insgesamt 45 ursprünglich optimal funktionierenden Bohrlochelektroden in Ketzin 11 Elektroden mit der Zeit von Gasen umschlossen wurden und damit keine elektrische Ankopplung an den Untergrund hatten. Diese Elektroden dienten daher bei den Ankopplungsmessungen aufgrund der hohen Ankopplungswiderstände als direkte CO_2 -Anzeiger. Desweiteren wurde bestätigt, dass keine Korrosionsvorgänge, sondern Risse im Kabelmantel dazu geführt haben mussten, dass acht der 45 Elektroden nicht funktionsfähig blieben (in Abb. 4.8 grau markiert). Die Edelstahlelektroden wurden in Ketzin einem Praxistest in einer chemisch aggressiven Umgebung unterzogen. Obwohl die Elektroden das erste Injektionsjahr salinen Formationsfluiden im Sandsteinaquifer ausgesetzt waren und sie prinzipiell korrodieren konnten, wurden für diesen Zeitraum keine Korrosionserscheinungen nachgewiesen. Edelstahlelektroden waren somit für eine langfristige Nutzung im Bohrloch zur CO_2 -Überwachung geeignet.

5. Geoelektrische Oberflächen-Bohrloch- und Oberflächen-Oberflächen-Messungen zur Überwachung der CO₂-Ausbreitung

Ziele der geoelektrischen Oberflächen-Bohrloch- und Oberflächen-Oberflächen-Messungen (kombinierte geoelektrische Messungen) waren neben der Beobachtung und Abbildung des CO₂-Injektionsfortschrittes im Untergrund in Raum und Zeit die Erweiterung des Beobachtungsraumes der geoelektrischen Bohrlochmessungen (Kap. 4). Aufgrund der angenommenen Aufwölbung der Speicherschicht in nördlicher Richtung und des ermittelten Verlaufs dieser Rinnensandsteinschichten im nahen Umfeld der drei Bohrungen in NW-SE Richtung (Kazemeini *et al.*, 2009; Norden & Frykman, 2013), war mit einer prinzipiellen CO₂-Ausbreitung innerhalb des Reservoirs in diese Richtung zu rechnen (Kap. 3.2.4). Aus technischen Gründen musste die ursprünglich geplante Injektionsbohrung vom Osten der Anordnung in den Westen verlegt werden (Kap. 4.1). Somit bestand das Risiko, dass sich das CO₂ nicht in Richtung der beiden Beobachtungsbohrungen ausbreitet und somit nicht durch geoelektrische Bohrlochmessungen überwacht werden kann. Kombinierte geoelektrische Oberflächen-Bohrloch-Messungen boten somit eine vielversprechende Chance, eine solche Ausbreitung im Reservoir (weg von den Beobachtungsbohrungen) aufgrund des größeren Beobachtungsraumes dennoch abzubilden.

Ausgehend von den erwarteten geologischen Untergrundverhältnissen für das CO₂-Speicherexperiment am Pilotstandort Ketzin und den bergamtlich bindenden Auflagen für die Feldexperimente galt es, eine geeignete Elektrodenanordnung an der Erdoberfläche zu finden. Die Erarbeitung des Versuchsaufbaus und die Datenakquisition waren ausschließlich Aufgaben der hier vorgelegten Dissertation. Auf dieser geschaffenen Datengrundlage entstand bisher eine Dissertation von Bergmann (2012), die sich u.a. mit der Kombination von seismischen und geoelektrischen Daten anhand einer strukturbasierten Inversion beschäftigte.

Prinzipiell kann eine geoelektrische Widerstandstomographie mit jeder der im Kapitel 2.1.1 beschriebenen klassischen Elektrodenanordnungen durchgeführt werden. Vorrangig finden sie für Fragestellungen im klein- und mesoskaligen Erkundungsbereich Anwendung. Bei großskaligen Aufstellungen an der Erdoberfläche, wie bei den Feldexperimenten am Pilotstandort Ketzin, sind große Kabelauslagen notwendig. Somit spielt bei der Auswahl einer geeigneten Elektrodenkonfiguration neben der Erkundungstiefe der Aufwand der Messungen eine entscheidende Rolle. Erfahrungen

mit großskaligen Tiefengeoelektrik-Experimenten sind ausführlich in Kapitel 2.3.1 beschrieben.

Für die Durchführung des Monitoringexperimentes mittels kombinierter geoelektrischer Messungen an der Erdoberfläche und in den Bohrungen wurden Dipol-Dipol-Standard-Elektrodenkonfigurationen (CCPP) auf zwei Kreisprofilen um die drei Bohrungen gewählt (Kießling *et al.*, 2009; Kießling *et al.*, 2010b). Sie sind aus theoretischen und praktischen Gründen am geeignetsten. Dipol-Dipol-Anordnungen liefern aufgrund ihrer Abbildungseigenschaften einen hohen Informationsgehalt und ermöglichen den geringsten materiellen und logistischen Aufwand in der Durchführung des Großexperiments.

Das Auflösungsvermögen großskaliger Oberflächenauslagen ist in der Beobachtungstiefe von rund 650 m für die CO₂-Speicherung am Standort Ketzin zu gering, da es für Dipol-Dipol-Anordnungen mit der Tiefe abnimmt. Um das Auflösungsvermögen in größerer Erkundungstiefe zu verbessern, wurden zusätzlich Bohrlochelektroden genutzt und geoelektrische Bohrloch-Oberflächen-Messungen durchgeführt.

Eine umfangreiche Experimentbeschreibung der geoelektrischen Gleichstrom Oberflächen-Bohrloch- und Oberflächen-Oberflächen-Messungen auf den zwei Kreisprofilen um die drei Bohrungen erfolgt im Kapitel 5.1. Zum besseren Verständnis werden die Experimente zeitlich in den CO₂-Speicherprozess eingeordnet. Es werden die Auswertung der umfangreichen Datenmengen im Frequenzbereich (Kap. 5.2) und die Ergebnisse der 3D-Inversion vorgestellt und diskutiert (Kap. 5.3 und 5.4). Abschließend werden die Ergebnisse der geoelektrischen Messungen mit den Ergebnissen anderer Methoden, die in Ketzin Anwendung fanden, verglichen und bewertet (Kap. 5.5).

Die Auswertung der geoelektrischen Oberflächen-Bohrloch- und Oberflächen-Oberflächen-Messungen im Zeitbereich ist in Bergmann *et al.* (2012) und Bergmann *et al.* (2016b) beschrieben.

5.1 Versuchsaufbau und Datenakquisition

Die durchgeführten kombinierten geoelektrischen Messungen dienen der räumlichen und zeitlichen Überwachung der dreidimensionalen Widerstandsverteilung im Reservoir vor und während der CO₂-Speicherung am Pilotstandort Ketzin. Sie sollten den Beobachtungsraum der geoelektrischen Messungen in den drei Bohrungen erweitern

und ergänzen und somit detailliertere Aussagen zu möglichen Richtungsabhängigkeiten bei der CO₂-Ausbreitung und dem Injektionsfortschritt im Speicherhorizont treffen.

Jedes Feldexperiment der kombinierten geoelektrischen Messungen besteht aus einer

- Oberflächen- und
- aus einer Bohrlochmessenanordnung,

die in Abbildung 5.1 schematisch zusammengefasst sind.

5.1.1 Oberflächenmessenanordnung

Die Anordnung der Oberflächendipole im Feld wurde durch bergamtliche Regelungen und durch eine Vielzahl von vorhandenen unterirdischen Rohrleitungen begrenzt. Außerdem war die Anzahl der Oberflächendipole von der Anzahl der verfügbaren Datenaufnehmer abhängig. Die Anordnung der Oberflächenelektroden erfolgte daher auf zwei konzentrischen Kreisen um die drei Bohrungen in jeweils acht nicht permanent installierten Oberflächendipolen (EO1 bis EO16), dessen Koordinaten in Tabelle A.10 zusammengefasst sind. Abbildung 5.2 zeigt den Lageplan zusammen mit einer Luftbildaufnahme des Messgebietes.

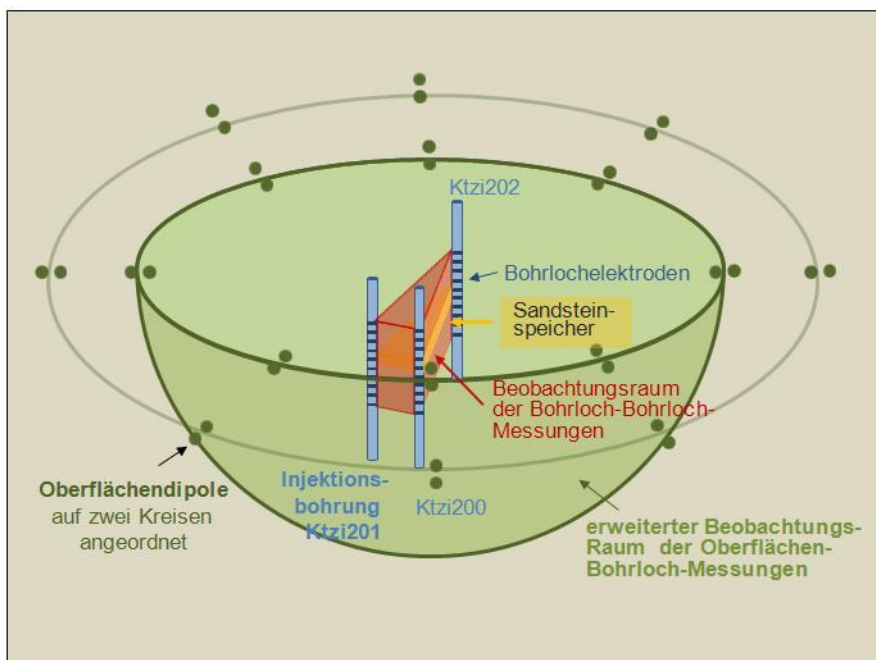


Abb. 5.1: Schematische Zusammenstellung der Oberflächen- (grün) und der Bohrlochmessenanordnung (blau) der geoelektrischen Oberflächen-Bohrloch- und Oberflächen-Oberflächen-Messungen auf zwei Kreisprofilen (nach Kießling *et al.*, 2010b). Eine präzisere Darstellung der Bohrlochanordnung ist in Kapitel 4.2 (Abb. 4.8) zu finden.

Die Radien der beiden Kreisprofile um die Bohrungen betrugen für den Innenkreis rund 1.090 m und für den Außenkreis rund 1.925 m. Die Dipole wurden strahlenförmig um die drei Bohrungen mit einer durchschnittlichen Dipollänge von 150 m angeordnet (Tab. 5.1). Der Oberflächendipol (EO12) in der Ortschaft Ketzin konnte aufgrund der vorherrschenden Bebauung (sowie Lärmschutz- und Absperrauflagen) nur mit einer Länge von rund 95 m umgesetzt werden. Die Oberflächendipole wurden sowohl zur Stromeinspeisung (CC) als auch zur Potentialmessung (PP) genutzt (Tab. 5.2).

Bei Dipol-Dipol-Großauslagen (CCPP) ist der Einsatz hochleistungsfähiger Stromversorgungseinheiten (zur Erzeugung hoher Elektrodenströme an der Erdoberfläche) und der Einsatz von hochauflösenden Registriereinheiten (keine Standardmessgeräte) notwendig, um die auftretenden sehr geringen Spannungen am räumlich entfernten Empfangsdipol messen zu können. Als Stromquelle (Abb. 5.3, links) diente die TSQ-4 der Firma Scintrex Limited (Kanada) mit einer Maximalleistung von 10 kW, die bei Spannungen bis 3,3 kV Ströme bis zu mehreren Ampere (max. 20) liefert. Die Stromquelle TSQ-4 besteht aus einem benzinbetriebenen Generator mit Kontrolleinheit, die auf einen PkW-Anhänger montiert und somit im Feld flexibel beweglich ist, und einem Transmitter. Es wurde ein Gleichstrom mit gepulstem Rechtecksignal mit der Folge + an, aus, - an, aus (zur Vermeidung von Polarisierungseffekten) und einer Periode von 16 s (folglich einer Frequenz von 0,0625 Hz) in den Untergrund eingespeist. Das Herabsetzen der Erdungswiderstände (Übergangswiderstand zum Untergrund) wird durch Multierder erreicht.

Tab. 5.1: Dipollängen der Strom- und der Spannungsdipole an der Erdoberfläche sowie der Abstand des jeweiligen Dipolmittelpunktes zur Bohrung Ktzi200 für alle Oberflächendipole EO1 bis EO16 (Dipole auf dem Innenkreis: EO1 - EO8, sowie auf dem Außenkreis: EO9 - EO16).

	Dipollänge in m	Radius in m		Dipollänge in m	Radius in m
EO1	155	872	EO9	148	1.931
EO2	152	1.256	EO10	150	2.050
EO3	145	972	EO11	168	2.031
EO4	154	1.239	EO12	95	1.847
EO5	160	1.141	EO13	148	1.699
EO6	149	1.078	EO14	144	1.733
EO7	142	1.023	EO15	158	2.278
EO8	150	1.116	EO16	144	1.829
Mittelwert Innenkreis	151	1.087	Mittelwert Außenkreis	144	1.925

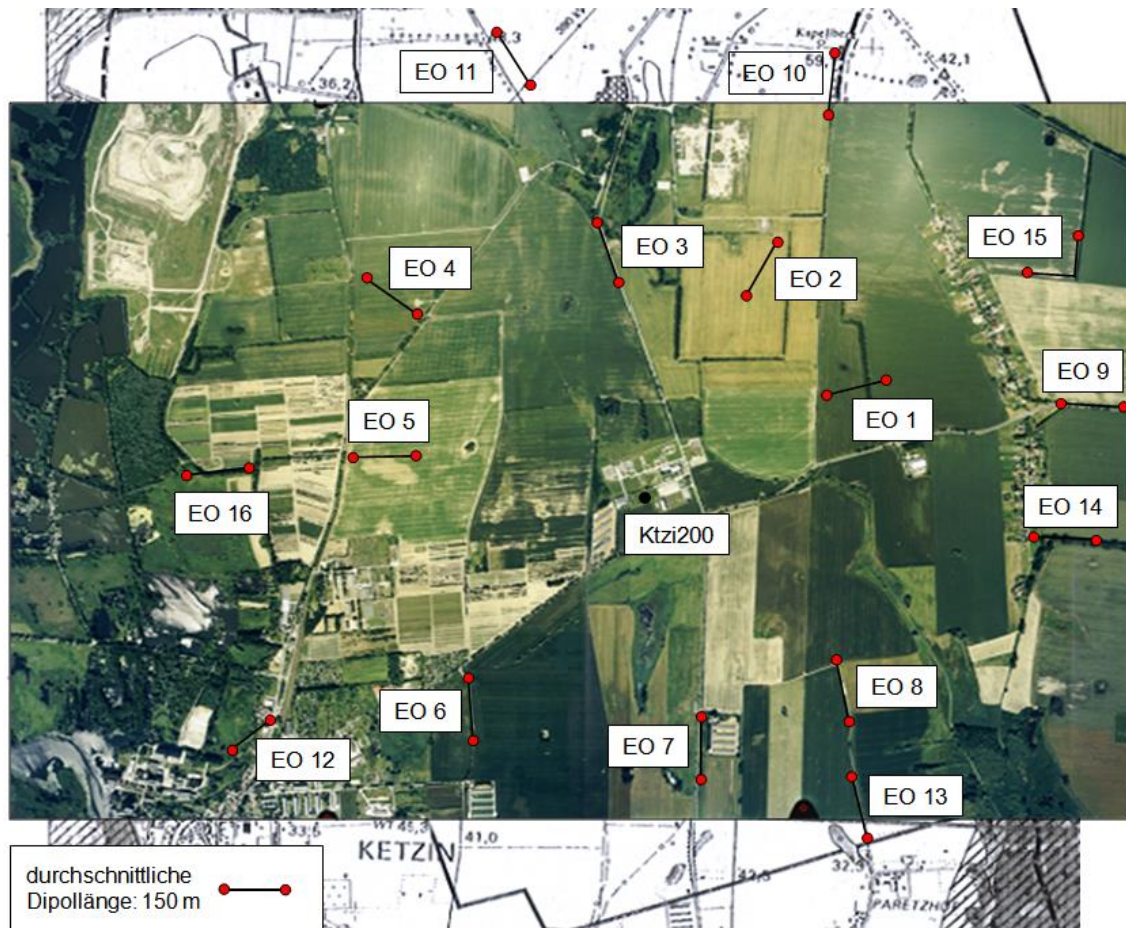


Abb. 5.2: Lageplan und Luftbild des Messgebietes (Quelle: Deutsches GeoForschungsZentrum Potsdam, 2007). Die Oberflächendipole sind mit roten Punkten gekennzeichnet und mit EO1 bis EO16 nummeriert. Der schwarze Punkt in der Mitte der Messanordnung markiert die Beobachtungsbohrung Ktzi200.

Tab. 5.2: Nutzung der Oberflächendipole auf zwei Kreisprofilen sowohl zur Stromeinspeisung (CC) als auch zur Potentialmessung (PP).

Oberflächendipole	Stromdipole (CC)	Potentialdipole (PP)
Multierder	Parallelschaltung von je 20 Stahlspießen	zwei Stahlspieße
Messausrüstung	Stromquelle TSQ-4 (Scintrex Limited): max. 10 kW; max. 3,3 kV; max. 20 A; 16 s Rechtecksignal	Datenaufnehmer Texan-125 und Texan-125A (Refraction Technology Inc.): 40 Hz Samplingrate
Dipollänge	150 m	150 m
Stromeinspeisung/ Registrierung	etwa 45 min	etwa 45 min
Anzahl	16 zur Stromeinspeisung	je 15 zur Spannungsregistrierung



Abb. 5.3: Stromquelle TSQ-4 (links), Datenaufnehmer Texan-125 (rechts: oben) und Stahlspeie als Stromerder (rechts: unten).

Zur Stromeinspeisung an der Erdoberfläche wurde für jede Stromdipolelektrode (CC) eine Parallelschaltung von je 20 Stahlspeien (Eigenbau der Universität Leipzig, Länge rund 30 cm, Durchmesser rund 1 cm) auf einer Fläche von maximal einem Quadratmeter als Stromerder (Abb. 5.3, unten rechts) genutzt. Durch die Parallelschaltung der Stahlspeie vergrößert sich die Elektrodenoberfläche und verringert den Übergangswiderstand zum Untergrund (Miltzer & Weber, 1985). Zusätzlich wurden die Elektroden bewässert, um die elektrische Ankopplung zum Erdboden zu verbessern. An jedem Oberflächendipol wurde etwa 45 min lang Strom in den Untergrund injiziert. Die Anwendung einer Parallelschaltung von Stahlspeien zur Stromeinspeisung verursacht gegenüber vergrabenen Metallgittern (z.B. Brunner *et al.*, 1999) keinen nennenswerten Flurschaden, und kann somit jahreszeitenunabhängig eingesetzt werden. Sie bietet neben logistischen vor allem zeitliche Vorteile.

Die Potentialmessung fand an allen 15 Oberflächendipolen (den Oberflächendipol, an dem die Stromeinspeisung stattfand jeweils ausgenommen) zeitgleich statt. Die Potentialdifferenz wurde jeweils zwischen den beiden Edelstahlspießen (PP) über die gesamte Zeit der Stromeinspeisung von 45 min registriert. Aus logistischen Gründen musste auf den Einsatz von unpolarisierbaren Elektroden (z.B. Kupfer-Kupfer-Sulfat-Elektroden, Cu-CuSO₄, z.B. Brunner *et al.*, 1999) verzichtet werden. LaBrecque & Daily (2008) untersuchten in ihren geoelektrischen Laborstudien den Einfluss des Elektrodenmaterials auf den Messfehler und somit auf die Datenqualität. Sie bewerten die von Edelstahlelektroden produzierten Fehler als relativ akzeptabel. Für die Messungen in Ketzin werden niederfrequente Wechselströme verwendet, um die an metallischen Elektroden auftretenden Kontakt- und Polarisierungseffekte zu vermeiden.

(Militzer & Weber, 1985) bzw. zu minimieren. Die Potentialregistrierung mit Edelstahlspießen konnte bei geoelektrischen Untersuchungen von hydraulischen Transportprozessen in den Störzonen der Umgebung um die Kontinentale Tiefbohrung (Laaß *et al.*, 2006) bereits erfolgreiche angewendet werden.

Die meisten geoelektrischen Apparaturen (wie beispielsweise das Messgerät GeoTom für die Bohrlochmessungen) sind für Standardmessungen konzipiert. Großskalige tiefengeoelektrische Anwendungen erfordern die Messung sehr kleiner Potentialdifferenzen, u.a. bedingt durch die große Erkundungstiefe und das geforderte hohe Auflösungsvermögen. Eine geräteinterne Signalbearbeitung erlaubt folglich keine objektive Einschätzung der Qualität der Messwerte. Die Messung von Spannungszeitreihen mit geeigneten Datenaufnehmern und ihre individuelle digitale Nachbearbeitung bieten eine gute Alternative. Solche Datenaufnehmer wurden bereits in tiefengeoelektrischen Experimenten zur strukturellen Erkundung und zur Beschreibung von Prozessen von Hydrothermalsystemen erfolgreich eingesetzt (Kap. 2.3.1).

Am Pilotstandort Ketzin wurden daher die Datenaufnehmer Texan-125 und Texan-125A (Abb. 5.3, oben rechts) der amerikanischen Firma Refraction Technology Inc. genutzt. Die Abtastrate der Datenaufnehmer betrug 40 samples/ s. Die Gesamtanzahl von 16 Stromeinspeisungen führte zu einer maximal möglichen Anzahl von 240 gemessenen Spannungszeitreihen des geoelektrischen Oberflächen-Oberflächen-Feldexperiments auf zwei Kreisprofilen. Die jeweils mögliche und tatsächliche aufgenommene Anzahl der Datenpunkte ist für jedes Feldexperiment in Tabelle 5.3 zusammengefasst. Das Stromsignal $I(t)$ wurde ebenfalls mit einem Datenaufnehmer Texan-125 registriert.

Tab. 5.3: Anzahl der möglichen Datenpunkte (eckige Klammer) und der tatsächlich verfügbaren (ohne Klammer) für jedes geoelektrische Feldexperiment auf den zwei Kreisprofilen (Wdh. = Wiederholung, EO-EO = Oberflächen-Oberflächen-Messung; EO-BL = Oberflächen-Bohrloch-Messung).

	[Mögliche Messdaten- Anzahl]		Tatsächliche Messdaten-Anzahl, bedingt durch Datenausfall				
	Erste Nullmessung		Zweite Nullmessung		Erste Wdh.	Zweite Wdh.	Dritte Wdh.
Kreisprofil	[848]	690	[912]	886	910	872	[840] 840
EO-EO	[240]	181	[240]	225	240	207	[210] 210
EO-BL	[608]	509	[672]	661	670	672	[630] 630

5.1.2 Bohrlochmessanordnung

Die Anordnung der Bohrlochdipole ist durch das permanent installierte Vertikal-elektrodensystem bestimmt. Der technische Aufbau von VERA ist ausführlich in Kapitel 4.1 beschrieben. Die Bohrlochdipole wurden ausschließlich zur Potentialmessung (PP) genutzt (Tab. 5.4), da die elektrischen Ströme, die über die Bohrloch-kabel fließen durften, aus technischen Gründen auf maximal 3 A begrenzt waren.

Die Spannungsregistrierung wurde jeweils zwischen zwei benachbarten Bohrloch-elektroden (Elektrodenabstand 10 m) mit den Datenaufnehmern Texan-125 und Texan-125A realisiert. Die Potentialmessung fand an allen 42 Bohrlochdipolen (14 benachbarte Elektroden je Bohrung) zeitgleich statt. Aufgrund der hohen Anzahl an benötigten Datenaufnehmern mussten die Spannungsmessungen an den Bohrlochdipolen in drei Zeitintervallen von je 15 min erfolgen (erstes Zeitintervall: Ktzi200, zweites Zeitintervall: Ktzi201 und drittes Zeitintervall: Ktzi202). Die Gesamtanzahl von 16 Stromeinspeisungen und jeweils 42 Spannungsregistrierungen in den drei Bohrungen führte zu einer maximal möglichen Anzahl von 672 Messwertreihen der geoelektrischen Oberflächen-Bohrloch-Messungen (Tab. 5.3).

Ausschließlich bei der ersten Nullmessung wurden weniger Spannungsdipole in den Bohrungen Ktzi200 und Ktzi201 gemessen, da weniger Datenaufnehmer für das Feldexperiment zur Verfügung standen. Anstelle der Spannungsdipole 1 - 2, 2 - 3, 13 - 14, 13 - 15 (Ktzi200) und 16 - 17, 17 - 18, 28 - 29, 29 - 30 (Ktzi201) wurden die Spannungsdipole 1 - 3, 13 - 15 (Ktzi200) sowie 16 - 18, 28 - 30 (Ktzi201) genutzt. Für die dritte Wiederholungsmessung konnte der Oberflächendipol EO12 (in der Ortschaft Ketzin) aufgrund der aktuellen Bebauungssituation weder als Stromdipol noch als Spannungsdipol genutzt werden und lieferte somit keine Messdaten.

5.1.3 Zeitliche Einordnung

Es wurden zwei Messungen vor dem Start der CO₂-Injektion durchgeführt, die im Folgenden als Nullmessungen bezeichnet werden. Anhand dieser **zwei Nullmessungen** sollten Aussagen zur Reproduzierbarkeit der Messwerte getroffen und saisonale Schwankungen ausgeschlossen werden (Kießling *et al.*, 2010a). Die erste Nullmessung fand im Oktober 2007 zeitnah nach dem Niederbringen der drei Bohrungen (05/2007 - 08/2007) und die zweite 04/2008 vor dem Injektionsstart (06/2008) statt.

Tab. 5.4: Bohrlochanordnung der geoelektrischen Oberflächen-Bohrloch- und Oberflächen-Oberflächen-Messungen auf den zwei Kreisprofilen.

Bohrlochdipole	Potentialdipole (PP) in allen drei Bohrungen
Erder	permanente Bohrlochelektroden von VERA
Messausrüstung	Datenaufnehmer Texan-125 und Texan-125A (Refraction Technology Inc.): 40 Hz Samplingrate
Dipollänge	10 m
Registrierung	15 min (je Bohrung)
Anzahl	42 (14 je Bohrung) zur Spannungsregistrierung in allen drei Bohrungen

Tab. 5.5: Zeitliche Einordnung der geoelektrischen Feldexperimente: Oberflächen-Bohrloch- und Oberflächen-Oberflächen-Messungen auf zwei Kreisprofilen unter Berücksichtigung des Injektionsfortschritts. Die zeitliche Einordnung der Experimente nach 2009 (*) und die dazugehörigen CO₂-Injektionsmengen beziehen sich auf Angaben aus Martens *et al.* (2012) und Bergmann *et al.* (2016a).

	Art des Experiments/ Stand des Injektionsfortschritts	CO ₂ -Injektionsmenge in t
10/2007	Erste Nullmessung (Kreisprofile)	-
04/2008	Zweite Nullmessung (Kreisprofile)	-
06/2008	Injektionsstart	-
07/2008	CO ₂ -Ankunft an der Beobachtungsbohrung Ktzi200 (50 m Abstand zur Injektionsbohrung Ktzi201)	531
07/2008	Erste Wiederholungsmessung (Kreisprofil)	rund 600
11/2008	Zweite Wiederholungsmessung (Kreisprofil)	rund 4.500
03/2009	CO ₂ -Ankunft an der Beobachtungsbohrung Ktzi202 (112 m Abstand zur Injektionsbohrung Ktzi201)	rund 11.000
04/2009	Dritte Wiederholungsmessung (Kreisprofil)	rund 13.700
03/2011*	Vierte Wiederholungsmessung (Kreisprofil)	rund 48.000*
03/2012*	Fünfte Wiederholungsmessung (Kreisprofil)	rund 60.000*

Wiederholungsmessungen sollten während der CO₂-Speicherung flexibel durchgeführt werden. Die **erste Wiederholung** der kombinierten geoelektrischen Messungen fand Ende 07/2008 (nach der Injektion von rund 600 t CO₂), unmittelbar nach der Ankunft des injizierten CO₂ an der 50 m entfernten Beobachtungsbohrung Ktzi200 (15.07.08), statt. Aufgrund der CO₂-Ausbreitung von der Injektionsbohrung Ktzi201 zu der Beobachtungsbohrung Ktzi200 in ungefähr 15 Tagen und unter der Annahme einer

ähnlich schnellen Ausbreitung zur Beobachtungsbohrung Ktzi202, erfolgte die **zweite Wiederholung** bereits Ende 11/2008 nach einer Injektion von rund 4.500 t CO₂. Die **dritte Wiederholung** fand Ende 04/2009 (nach der Injektion von rund 13.700 t CO₂), nach der CO₂-Ankunft an der 112 m entfernten Beobachtungsbohrung Ktzi202 (22.03.09), statt. Die zeitliche Einordnung der kombinierten geoelektrischen Messungen und der jeweilige CO₂-Injektionsfortschritt sind in Tabelle 5.5 zusammengestellt.

Die Ergebnisse der vierten (03/2011) und fünften Wiederholung (03/2012) liegen außerhalb des für diese Arbeit relevanten Messzeitraumes (bis 05/2009) und sind in Bergmann *et al.* (2016b) beschrieben.

5.2 Auswertung der Messdaten im Frequenzbereich

Die Messdaten der Dipol-Dipol-Anordnungen bestanden aus einzelnen Spannungszeitreihen. Das jeweils 45 minütige rechteckförmige Stromsignal $I(t)$ wurde mithilfe des gemessenen zeitlichen Spannungsabfalls $U_{Shunt}(t)$ zwischen den beiden Stromdipolelektroden über einen Nebenwiderstand (engl.: *Shunt*) R_{Shunt} im Datenaufnehmer berechnet. Der Shunt hatte eine Größe von 0,01 Ω. Für die Stromzeitreihe $I(t)$ ergab sich somit:

$$I(t) = \frac{U_{Shunt}(t)}{R_{Shunt}} = \frac{U_{Shunt}(t)}{0,01 \Omega} \quad (5.1)$$

Die Potentialdifferenzen wurden als Spannungszeitreihen $U(t)$ an der Erdoberfläche (jeweils insgesamt 45 min) und in den drei Bohrungen (jeweils 15 min) aufgenommen.

Prinzipiell lässt sich die Verteilung der scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstände im Untergrund mithilfe einer gängigen Datenbearbeitung der Signale im Zeitbereich bestimmen (Kap. 2.1.4). Bei Daten mit hohem Signal-Rausch-Verhältnis sind die Signalamplituden im Zeitbereich mitunter nur schwer bestimmbar. Eine Auswertung im Frequenzbereich (Kap. 2.1.4) bot an dieser Stelle eine alternative Möglichkeit der Datenanalyse.

Die Zeitreihen wurden fouriertransformiert und der jeweilige ohmsche Widerstand R folglich aus den Amplituden der Grundschrwingungen der Spannungs- und des Stromspektrums und ihren Harmonischen berechnet. Unter der Annahme, dass das Rauschen der 1. bis 9. Harmonischen gleich war, wurden die Amplitudenverhältnisse gemittelt. Die Messwerte wurden mit der schnellen Fourier-Transformation (FFT) im Frequenzspektrum abgebildet. Mit Kenntnis der Geometrie der Messanordnung wurde die Verteilung der scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstände berechnet.

5.2.1 Zeitreihen und Amplitudenspektren

Abbildung 5.4 zeigt jeweils einen Zeitausschnitt aus dem eingespeisten rechteckförmigen Stromsignal (oben) und aus dem gemessenen rechteckförmigen Spannungssignal im Bohrloch (mitte) und an der Erdoberfläche (unten).

Abbildung 5.5 zeigt die dazugehörigen berechneten Amplitudenspektren (Linienpektrum) mit der Grundfrequenz von 0,0625 Hz und seinen Harmonischen, die zur Berechnung der Amplitudenquotienten genutzt wurden.

Im Linienpektrum ist die Abnahme der dargestellten Amplituden der Harmonischen mit zunehmender Frequenz zu erkennen (Abb. 5.5). Zur Datenauswertung wurden Teilzeitreihenlängen von je 12 min genutzt, da sie eine ganzzahlige Periodenanzahl der Messfrequenz enthalten. Auf Grundlage der Untersuchungen von Radic (2008) wird nur so ein optimales Signal-Rausch-Verhältnis erzielt.

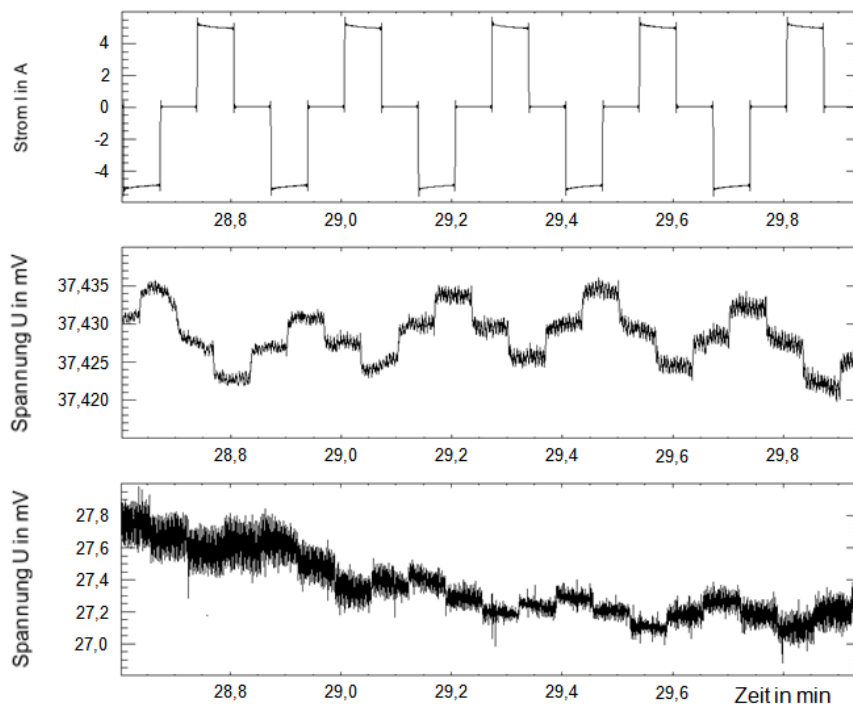


Abb. 5.4: Darstellung eines Beispielstromsignals $I(t)$ für die Einspeisung am 30.07.2008 (erste Wiederholungsmessung) am Oberflächendipol EO7 (oben) und das gemessene Spannungssignal $U(t)$ an den Elektroden 23 und 24 in der Injektionsbohrung Ktzi201 (mitte), sowie am Oberflächendipol EO6 (unten) für ein Zeitintervall von jeweils 80 Sekunden.

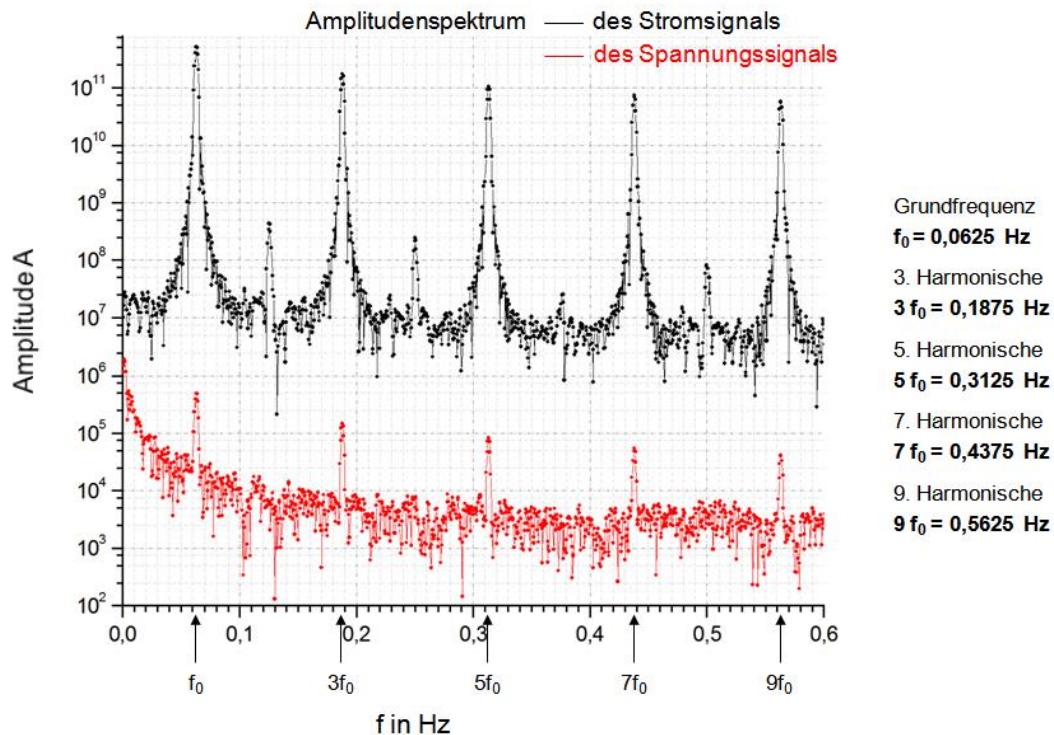


Abb. 5.5: Beispiel für die Abbildung des Amplitudenspektrum eines eingespeisten Strom- (schwarz) und eines gemessenen Spannungssignals (rot) für die erste Wiederholung (30.07.2008, CC = EO7, PP = Ktzi201: Elektroden 23 - 24) der geoelektrischen Oberflächen-Bohrlochmessungen. Dargestellt sind jeweils die Grundfrequenz von 0,0625 Hz und ihre 3., 5., 7. und 9. Harmonische.

5.2.2 Verteilung der scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstände

Die aus den Amplitudenspektren berechneten scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstände der kombinierten geoelektrischen Messungen sind für ihre beiden Nullmessungen (10/2007 und 04/2008) und für die drei Wiederholungsmessungen (07/2008, 11/2008 und 04/2009) als Pseudosektionen in Abbildung 5.6 dargestellt. Der farbcodierte scheinbare elektrische Widerstand ist für jede Stromeinspeisung an dem jeweiligen Oberflächendipol EO1 bis EO16 (x-Achse) und für jede Spannungsmessung an dem dazugehörigen Dipol (y-Achse) im Bohrloch (von oben nach unten: Ktzi200, Ktzi201 und Ktzi202) sowie an der Erdoberfläche (unten) für die einzelnen Messungen logarithmisch aufgetragen.

Die beiden Nullmessungen, die vor dem Start der CO_2 -Injektion aufgenommen wurden, zeigen für die geoelektrischen Oberflächen-Oberflächenmessungen (Abb. 5.6, unten) ähnliche Messwerte. Lediglich die Messungen mit beteiligtem Oberflächendipol EO12 zeigen in den beiden Nullmessungen sehr hohe scheinbare elektrische Widerstände.

Die beiden Nullmessungen liefern für die geoelektrischen Oberflächen-Bohrlochmessungen (Abb. 5.6, oben) ebenfalls ähnliche Messwerte. Für die erste Nullmessung sind lediglich für die Stromeinspeisung an EO1 in der Bohrung Ktzi201 und an den unteren Elektroden in Ktzi202 hohe scheinbare elektrische Widerstände erkennbar. Für die zweite Nullmessung wurden für die Stromeinspeisungen am Oberflächendipol EO5 in der Bohrung Ktzi200, am Dipol EO1 in Ktzi201 sowie am Dipol EO10 in Ktzi202 erhöhte scheinbare elektrische Widerstände gemessen. In den beiden Beobachtungsbohrungen Ktzi200 und Ktzi202 (Abb. 5.6, erste und dritte Darstellung von oben) wurden für die zweite Nullmessung für nahezu alle Stromeinspeisungen an den Spannungsdipolen mit beteiligter Elektrode 11 (Ktzi200) und 39 (Ktzi202) teilweise bereits sehr hohe scheinbare elektrische Widerstände (rund 100 - 1.000 Ωm) gemessen.

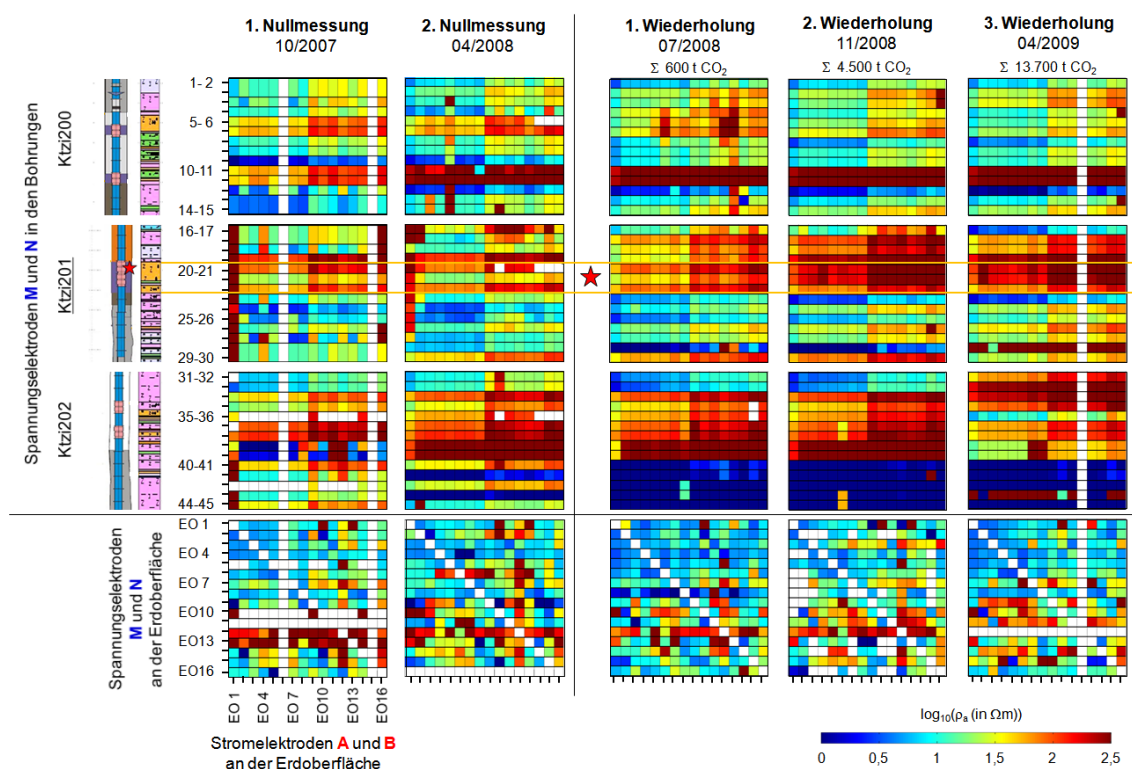


Abb. 5.6: Farbcodierte logarithmische Darstellung der berechneten scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstände aus den Stromeinspeisungen an den Oberflächendipolen EO1 bis EO16 und den dazugehörigen Spannungsmessungen an den Bohrlochdipolen (in der Injektionsbohrung Ktzi201 und den beiden Beobachtungsbohrungen Ktzi200 und Ktzi202) und an den restlichen Oberflächendipolen für die beiden Nullmessungen sowie die drei Wiederholungsmessungen. Links neben den Pseudosektionen sind die im Tiefenbereich von VERA liegende Bohrlochabschnitte mit den Zementationsbereichen und der Lithologie für die jeweilige Bohrung dargestellt (nach Abb. 4.8, Kap. 4.2.4.1). Der rote Stern markiert den Ort der CO₂-Injektion in der Bohrung Ktzi201. Die gelbe Markierung kennzeichnet die jeweilige schematische Tiefenlage der Sandsteinschicht in den drei Bohrungen.

Im Vergleich zu den beiden Nullmessungen liefern auch die Wiederholungs-messungen in den Tiefenbereichen ohne CO₂-Einfluss reproduzierbare Messwerte. Die Bereiche mit höheren scheinbaren elektrischen Widerständen im Bohrloch werden im Folgenden beschrieben:

In der Beobachtungsbohrung **Ktzi200** (Abb. 5.6, obere Darstellung) wurden ab der ersten Wiederholungsmessung für nahezu alle Stromeinspeisungen an den Spannungsdipolen mit beteiligter Bohrlochelektrode 11 sehr hohe scheinbare elektrische Widerstände (rund 1.000 Ωm) gemessen. Zusätzlich zeigen die Messwerte an den Bohrlochelektroden 3 bis 6 vorerst nur geringere Widerstände, die sich in der zweiten Wiederholungsmessung geringfügig auf rund 65 Ωm erhöhen.

In der Injektionsbohrung **Ktzi201** (Abb. 5.6, zweite Darstellung von oben) wurden in der ersten Wiederholungsmessung an den Bohrlochelektroden 18 bis 22 vorerst nur sehr geringe Widerstandserhöhungen gemessen, die in der zweiten und dritten Wiederholungsmessung stark erhöhte Werte von rund 430 Ωm erreichten.

In der Beobachtungsbohrung **Ktzi202** (Abb. 5.6, dritte Darstellung von oben) wurden ab der ersten Wiederholungsmessung für nahezu alle Stromeinspeisungen an den Spannungsdipolen mit beteiligter Bohrlochelektrode 39 hohe bis sehr hohe scheinbare elektrische Widerstände (bis 1.400 Ωm) gemessen. Zusätzlich sind an den Bohrlochelektroden 34 bis 37 vorerst nur sehr geringe Widerstandserhöhungen erkennbar, die in der zweiten und dritten Wiederholungsmessung erhöhte Werte von bis zu 800 Ωm erreichen. In der dritten Wiederholungsmessung zeigen sich zusätzlich an den Bohrlochelektroden 31 bis 33 deutlich erhöhte Widerstandswerte (rund 330 Ωm). Im Vergleich zu den beiden Nullmessungen wurden für alle drei Wiederholungsmessungen für nahezu alle Stromeinspeisungen an den Spannungsdipolen mit beteiligten Bohrlochelektroden 40 bis 45 sehr geringe scheinbare elektrische Widerstände (unter 1 Ωm) gemessen.

5.3 Inversionsergebnisse

Für die 3D-Inversion der kombinierten geoelektrischen Messungen wurde, analog zur 3D-Inversion der geoelektrischen Bohrlochmessungen (Kap. 4), der Open-Source Programmcode BERT genutzt (Kap. 2.1.4). Während in Tabelle A.9 ausgewählte Inversionsparameter zusammengefasst sind, zeigt Abbildung A.3 das für die Inversion genutzte Parameternetz und die räumliche Ausdehnung des Sekundärfeldnetzes (für die

Vorwärtsmodellierung). Es wurden Datenfehler von rund 10 % angenommen und Messungen mit beteiligten Elektroden 11, 39 bis 45 vorab eliminiert (Kap. 4.7).

Die Inversionsergebnisse der Nullmessungen sind in Abbildung 5.7 und die der Wiederholungsmessungen in Abbildung 5.8 zusammengefasst. Die spezifischen elektrischen Widerstände sind farbcodiert in 2D-Vertikalschnitten zwischen den Bohrungen Ktzi201 - Ktzi202, Ktzi201 - Ktzi200 und Ktzi200 - Ktzi202, sowie in zwei Tiefenschnitten dargestellt. Der erste dargestellte Tiefenschnitt zeigt die elektrische Widerstandsverteilung in einer Tiefe von -586 m ü. NN. Diese entspricht der Tiefe der Bohrlochelektrode 34 (Ktzi202) in rund 621 m (u GOK) und markiert die Oberkante der Stuttgart-Formation. Die Elektrode 35 befindet sich im Tiefenbereich der obersten Sandsteinschicht, die Elektrode 36 dicht darunter. Elektrode 37 liegt in der untersten Sandsteinschicht in Ktzi202. Der zweite dargestellte Tiefenschnitt zeigt die elektrische Widerstandsverteilung in einer Tiefe von -601 m ü. NN. Diese entspricht der Tiefe der Elektrode 20 (Ktzi201) und der Elektrode 5 (Ktzi200) in rund 635 m (u GOK) und kennzeichnet die Oberkante der Sandsteinschichten. Die Elektroden 20 bis 23 (Ktzi201), sowie die Elektroden 5 und 6 (Ktzi200) befinden sich im Tiefenbereich des Sandsteinreservoirs.

Die Ergebnisse der beiden **Nullmessungen**, die vor dem Start der CO₂-Injektion aufgenommen wurden, zeigen sehr gute reproduzierbare Messwerte (Abb. 5.7). Die beiden Inversionsergebnisse im jeweiligen Vertikalschnitt Ktzi201 - Ktzi200 bilden die Sandsteinschichten im bohrlochnahen Umfeld der Injektionsbohrung Ktzi201 mit einem elektrischen Widerstand von rund 150 Ω m (obere Sandsteinschicht) bis 100 Ω m (untere geringmächtigere Sandsteinschicht; siehe auch Abb. 4.8) ab. In den Abbildungen 5.7 und 5.8 werden diese beiden Sandsteinschichten als eine dickere zusammengefasst und schematisch dargestellt. Im Bohrlochumfeld von Ktzi200 erreicht der elektrische Widerstand der Sandsteinschicht gemessene Werte von rund 100 Ω m (z.B. Schnitt 201 - 200).

Der zweite Tiefenschnitt (Oberkante der Sandsteinschichten) fasst diese Widerstandswerte für das Umfeld der Injektionsbohrung Ktzi201 und der nahegelegenen Beobachtungsbohrung Ktzi200 zusammen. In der Bohrung Ktzi202 liegt der elektrische Widerstand der oberen dünnen Sandsteinschicht der Stuttgart-Formation bei rund 100 Ω m, und der der unteren dünneren Sandsteinschicht bei rund 250 Ω m (z. B. Schnitt 201 - 202). Aufgrund der eliminierten Messdaten mit beteiligten Elektroden 39 bis 45 liegen keine Informationen zum untersten Tiefenbereich der Bohrung Ktzi202 vor.

Der erste Tiefenschnitt (Oberkante der Stuttgart-Formation) zeigt den elektrischen Widerstand für das Umfeld der Injektionsbohrung Ktzi202 (obere Sandsteinschicht). Die Sandsteinschichten der Stuttgart-Formation sind von leitfähigen Schichten des Deckgebirges und von leitfähigen Schichten unterhalb des Speicherreservoirs umgeben. Erhöhte elektrische Widerstände von rund 50 Ωm bis 100 Ωm werden zusätzlich im Tiefenbereich der Elektrode 11 (Ktzi200), sowie an der Elektrode 1 (Ktzi200) und oberhalb der Bohrlochelektroden in Ktzi200 beobachtet (z.B. Schnitt 200 - 202). Die Ergebnisse der zweiten Nullmessung liefern für die Anomalie oberhalb der Bohrlochelektroden in Ktzi200 gemessene Werte von 150 Ωm .

Mit dem **Beginn der CO₂-Injektion** (06/2008) steigt der elektrische Widerstand in der Injektionsbohrung Ktzi201 im Tiefenbereich der oberen Sandsteinschicht während der ersten Wiederholungsmessung (07/2008) auf rund 250 Ωm an (Abb. 5.8; z.B. Schnitt 201 - 200). Das CO₂ wird in der Tiefe der Elektrode 21 (Ktzi201) in das Speichergestein injiziert und breitet sich dann im Sandsteinhorizont aus. Die Tiefenlage des CO₂-Injektionspunktes in Ktzi201 ist mit einem roten Stern markiert.

In der ersten Wiederholungsmessung weist die Sandsteinschicht in der nahegelegenen Beobachtungsbohrung Ktzi200 erhöhte elektrische Widerstände von rund 200 Ωm auf (z.B. Schnitt 201 - 200). In der Bohrung Ktzi202 liegen die gemessenen Werte der elektrischen Widerstände der oberen Sandsteinschicht ebenfalls bei rund 150 Ωm , während die Werte der unteren dünneren Sandsteinschicht auf bis zu 350 Ωm ansteigen (z. B. Schnitt 201 - 202). Die gemessenen Widerstandswerte im Tiefenbereich der Elektrode 11 (Ktzi200) bleiben mit rund 100 Ωm im Vergleich zu den beiden Nullmessungen unverändert, während die gemessenen Werte an der Elektrode 1 (Ktzi200) und oberhalb der Bohrlochelektroden in Ktzi200 geringfügig auf bis zu 200 Ωm ansteigen (z.B. Schnitt 200 - 202).

Während der zweiten und dritten Wiederholungsmessung steigt der elektrische Widerstand am Injektionspunkt in Ktzi201 im Tiefenbereich der oberen Sandsteinschicht und in Bereichen darüber deutlich an und erreicht Werte von rund 700 Ωm (z.B. Schnitt 201 – 200 und zweiter Tiefenschnitt).

Ab der zweiten Wiederholungsmessung erscheint der Tiefenbereich der Sandsteinschicht in der nahegelegenen Beobachtungsbohrung Ktzi200 niederohmig (z.B. Schnitt 201 - 200), während die gemessenen Werte an der Elektrode 1 (Ktzi200) und oberhalb der Bohrlochelektroden in Ktzi200 deutlich auf bis zu 550 Ωm ansteigen (z.B. Schnitt 200 - 202).

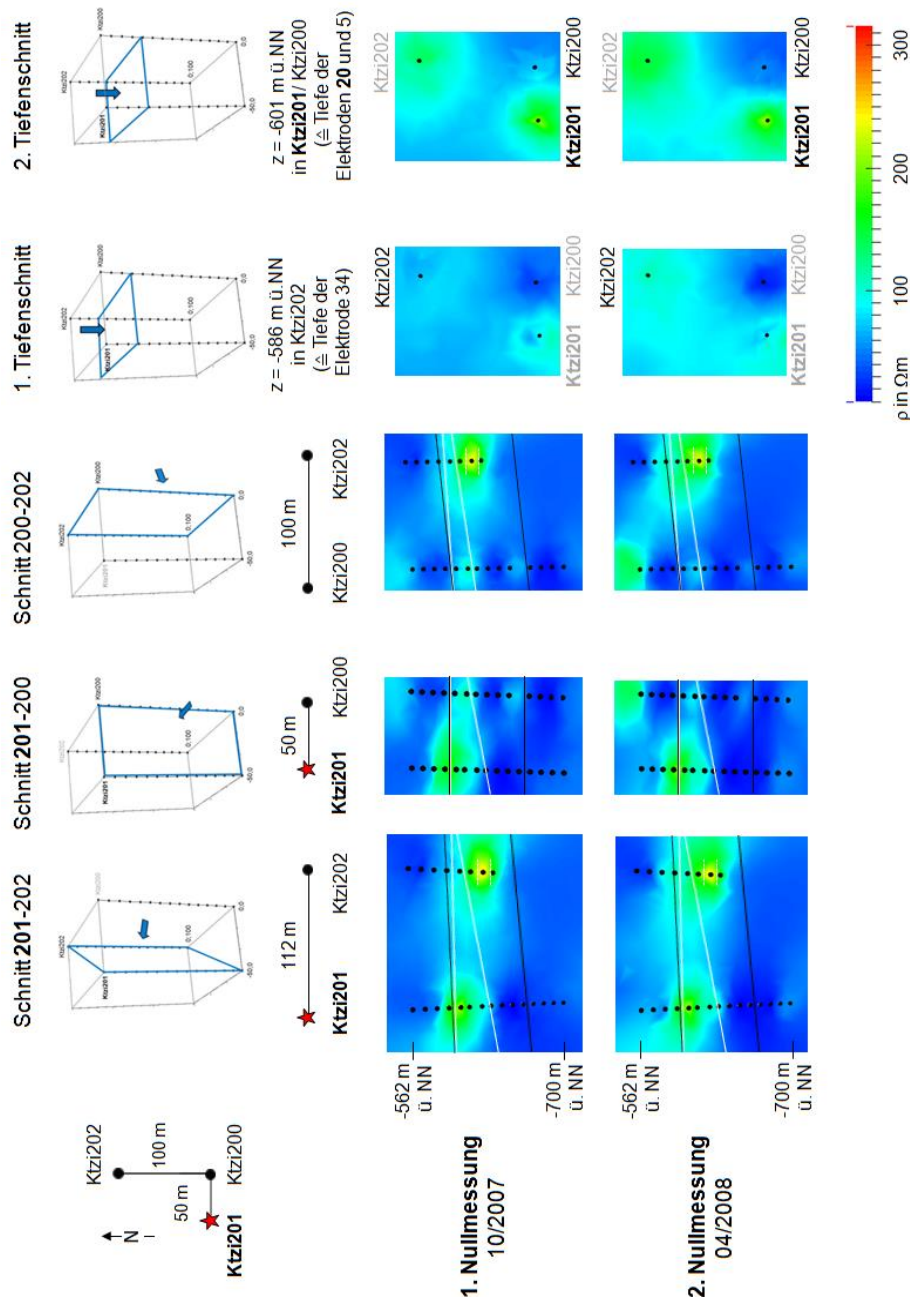


Abb. 5.7: Farbcodierte Darstellung der spezifischen elektrischen Widerstände als Inversionsergebnisse der beiden Nullmessungen. Es sind die Vertikalschnitte zwischen den Bohrungen Ktzi201 - Ktzi202, Ktzi201 - Ktzi200 und Ktzi200 - Ktzi202, sowie die Tiefenschnitte zwischen allen drei Bohrungen in -586 m und -601 m (ü. NN) dargestellt. Der rote Stern markiert jeweils den Ort der CO₂-Injektion in der Bohrung Ktzi201. Die schwarze Markierung kennzeichnet die Stuttgart Formation, während die weiße Markierung die schematische Tiefenlage der Sandsteinschichten darstellt.

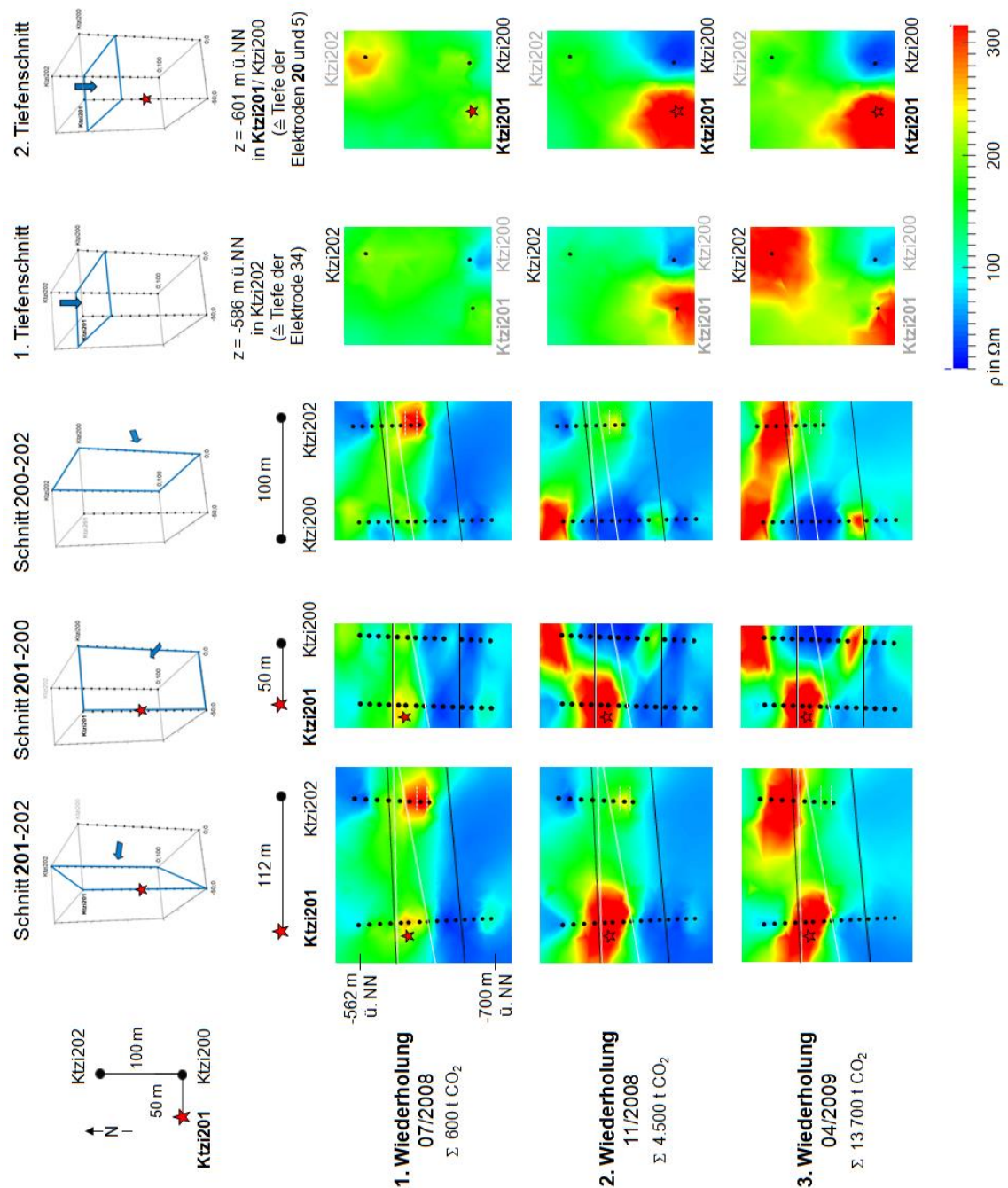


Abb. 5.8: Farbcodierte Darstellung der spezifischen elektrischen Widerstände als Inversionsergebnisse der drei Wiederholungsmessungen. Es sind die Vertikalschnitte zwischen den Bohrungen Ktzi201 - Ktzi202, Ktzi201 - Ktzi200 und Ktzi200 - Ktzi202, sowie die Tiefenschnitte zwischen allen drei Bohrungen in -586 m und -601 m (ü. NN) dargestellt. Die erste Wiederholungsmessung fand rund zwei Wochen nach der CO₂-Ankunft an der Bohrung Ktzi200 und die dritte Wiederholung rund einen Monat nach der CO₂-Ankunft an der Bohrung Ktzi202 statt. Der rote Stern markiert jeweils den Ort der CO₂-Injektion in der Bohrung Ktzi201. Die schwarze Markierung kennzeichnet die Stuttgart Formation, während die weiße Markierung die schematische Tiefenlage der Sandsteinschichten darstellt.

In der zweiten Wiederholungsmessung bleiben die gemessenen Widerstandswerte der oberen Sandsteinschicht in Ktzi202 mit rund 150 Ω m im Vergleich zur ersten Wiederholungsmessung unverändert, während die Werte der unteren dünneren Sandsteinschicht wieder auf rund 200 Ω m absinken (z.B. Schnitt 201 - 202). Ab der dritten Wiederholungsmessung zeigen sich im Tiefenbereich der oberen Sandsteinschicht und in Bereichen darüber starke Widerstandserhöhungen (z.B. Schnitt 201 - 202 und erster Tiefschnitt). Es wurden Werte von bis zu 600 Ω m gemessen, während der elektrische Widerstand der unteren dünneren Sandsteinschicht in Ktzi202 weiter auf rund 150 Ω m absinkt (z. B. Schnitt 201 - 202). Der gemessene elektrische Widerstand im Tiefenbereich der Elektrode 11 (Ktzi200) steigt in der zweiten Wiederholungsmessung auf rund 200 Ω m an und erhöht sich in der dritten Wiederholungsmessung weiter auf bis 350 Ω m.

5.4 Interpretation und Diskussion

Die **Pseudosektionen** der geoelektrischen Oberflächen-Bohrloch- und Oberflächen-Oberflächen-Messungen zeigen für die beiden Nullmessungen ähnliche scheinbare spezifische elektrische Widerstände (Abb. 5.6). Die Messungen lieferten somit reproduzierbare Messwerte.

Die Widerstandserhöhungen bei den Oberflächen-Bohrloch-Messungen lassen sich wie folgt erklären:

In der Injektionsbohrung **Ktzi201** (Abb. 5.6, zweite Darstellung von oben) wurden in der ersten Wiederholungsmessung (nach Beginn der CO₂-Injektion) an den Elektroden 20 und 22 vorerst nur sehr geringe Widerstandserhöhungen gemessen, wohingegen sich in der zweiten und dritten Wiederholungsmessung stark erhöhte Werte zeigten. Es wurden zusätzlich an den Bohrlochelektroden 18 und 19 stark erhöhte Widerstandswerte gemessen, die sich mit dem CO₂-Aufstieg im Ringraum erklären lassen und somit auch außerhalb der Sandsteinabfolgen hohe Widerstände abbilden. Die Ergebnisse der elektrischen Ankopplungsmessungen im Bohrloch beschreiben den CO₂-Aufstieg in der Injektionsbohrung bis zur Elektrode 18 (Kap. 4.4.1).

In der Beobachtungsbohrung **Ktzi200** (Abb. 5.6, obere Darstellung) waren in der ersten Wiederholungsmessung an den Elektroden 3 bis 6 vorerst nur sehr geringe Widerstandserhöhungen erkennbar, da diese Messung zeitlich lediglich 14 Tage nach der (vom Gassensor gemessenen) CO₂-Ankunft an der ersten Beobachtungsbohrung durchgeführt wurde. Die bis dahin injizierte Gesamtmenge von lediglich 600 t CO₂ führte

bei den großskaligen kombinierten geoelektrischen Messungen analog zu den geoelektrischen Messungen in den drei Bohrungen (Kap. 4.5.3) zu keiner messbaren Widerstandserhöhung. Allerdings konnten auch in der zweiten und dritten Wiederholungsmessung keine weiteren Widerstandserhöhungen gemessen werden. Eine mögliche Ursache hierfür könnte der unterschiedliche Tongehalt in der Speicherformation sein. Vermutlich führen die tonhaltigen Sandsteine in Ktzi200 zu geringeren Widerstandserhöhungen bei der CO₂-Ausbreitung als beispielsweise die Feinsandsteine in Ktzi202 (Kap. 4.5.3).

In der Beobachtungsbohrung **Ktzi202** (Abb. 5.6, dritte Darstellung von oben) lieferten die erste und zweite Wiederholungsmessung an den Elektroden 34 bis 37 vorerst stabile, reproduzierbare Messwerte im Vergleich zu den beiden Nullmessungen. Noch hatte das injizierte CO₂ nicht die entferntere Beobachtungs-bohrung erreicht. Erst in der dritten Wiederholungsmessung konnten an den Bohrlochelektroden 31 bis 33 stark erhöhte Widerstandswerte gemessen werden. Da die Elektroden in dieser Bohrung im Bereich des Caprock nicht zementiert wurden und sich somit im offenen Bohrloch befanden, stieg das dort ankommende CO₂ im Ringraum auf und führte zusätzlich an diesen Bohrlochelektroden zu Widerstandserhöhungen.

Ab der zweiten Nullmessung (04/2008) wurden für die Spannungsdipole mit beteiligter Bohrlochelektrode 11 (Ktzi200) und 39 (Ktzi202) durchgängig für alle Stromeinspeisungen hohe scheinbare elektrische Widerstände gemessen. In der ersten Nullmessung traten vorerst nur sehr vereinzelt geringe Widerstandserhöhungen an diesen beiden Bohrlochelektroden auf. Die Ergebnisse der elektrischen Ankopplungsmessungen im Bohrloch zeigten bereits ab 02/2008 Auffälligkeiten an diesen beiden Elektroden (Kap. 4.4.1). Währenddessen zeigten die Messungen mit den beteiligten Bohrlochelektroden 40 bis 45 sehr geringe scheinbare elektrische Widerstände (ab 04/2008). Die Untersuchung der langfristigen Funktionsfähigkeit der Bohrlochelektroden zeigte, dass diese Elektroden nicht funktionstüchtig blieben (Kap. 4.7).

Die dargestellten **Inversionsergebnisse** der kombinierten geoelektrischen Messungen liefern eine 3D-Widerstandsverteilung vor dem Beginn der CO₂-Injektion (Abb. 5.7) und beschreiben die CO₂-Ausbreitung ins Reservoir während des Injektionsprozesses (Abb. 5.8).

Die Vertikal- und Tiefenschnitte der Inversionsergebnisse der beiden Nullmessungen (10/2007 und 04/2008) lieferten reproduzierbare Messwerte (Abb. 5.7). Einflüsse saisonaler Schwankungen auf die Messwerte ließen sich somit ausschließen. Die Sandsteinschichten in der Injektionsbohrung Ktzi201 und der Bohrung Ktzi200, sowie die oberste Sandsteinschicht in der Bohrung Ktzi202 wiesen ähnliche Messwerte von rund 100 Ω m bis 150 Ω m auf. Wiese *et al.* (2010) konnten mithilfe hydraulischer Tests nachweisen, dass die Sandsteinschichten des Speicherhorizontes zwischen den drei Bohrungen hydraulisch miteinander verbunden sind. Damit war die Voraussetzung gegeben, dass sich das injizierte CO₂ auch zwischen den Bohrungen ausbreiten kann. Die unterste Sandsteinschicht in der Bohrung Ktzi202 zeigte dagegen höhere elektrische Widerstände von bis zu 250 Ω m. Da diese Sandsteinschicht bedeutend geringmächtiger ist (mitunter nur halber Elektrodenabstand), konnte sie geoelektrisch nicht aufgelöst werden. Somit war der Einfluss der umgebenen hochohmigen Schichten (vorrangig Ton- und Schluffsteine; Norden, 2007a, b, c) auf den gemessenen elektrischen Widerstand in diesem Tiefenbereich größer als der Einfluss der untersten geringmächtigen Sandsteinschicht.

In den Wiederholungsmessungen konnte die kontinuierliche Widerstandserhöhung nahe dem Injektionspunkt in Ktzi201 mit der fortschreitenden CO₂-Injektion erklärt werden (Abb. 5.8). Die Widerstandserhöhung im Bereich oberhalb des Injektionspunktes wurde von der CO₂-Ausbreitung im unzementierten Ringraum verursacht (Kap. 4.5.1). Dies bestätigten die PNG-Daten (CO₂-Sättigungsbestimmungen mit dem Puls-Neutron-Gamma-Verfahren; Bergmann *et al.*, 2012).

Die erste Wiederholungsmessung (07/2008) fand rund zwei Wochen nach der CO₂-Ankunft an der nahegelegenen Beobachtungsbohrung Ktzi200 (Kap. 3.3.6) statt. Widerstandserhöhungen sind somit ab der ersten Wiederholungsmessung im Umfeld der Bohrung Ktzi200 messbar.

Während in der ersten Wiederholungsmessung im Tiefenbereich der Sandsteinschicht in Ktzi200 im Gegensatz zu den beiden Nullmessungen erhöhte elektrische Widerstände von rund 200 Ω m messbar waren, erschienen sie in der zweiten (11/2008) und dritten (04/2009) Wiederholungsmessung niederohmig. Stattdessen stiegen die gemessenen

Werte an der Elektrode 1 (Ktzi200) und oberhalb der Bohrlochelektroden in Ktzi200 deutlich auf rund 550 Ωm an (z.B. Schnitt 200 - 202) und sind mit der CO₂-Ausbreitung zur Beobachtungsbohrung Ktzi200 hin begründbar.

Die deutlichen Widerstandserhöhungen im Umfeld der Bohrung Ktzi202 ab der dritten Wiederholungsmessung (einen Monat nach der CO₂-Ankunft an der Bohrung Ktzi202) belegen die CO₂-Ausbreitung bis zur entfernteren Beobachtungsbohrung Ktzi202 (z.B. Schnitt 201 - 202). Die Widerstandserhöhung in der Tiefe der Oberkante der Stuttgart-Formation zeigt sich auch im ersten Tiefschnitt (-586 m ü. NN).

Eine signifikante Widerstandszunahme aufgrund der CO₂-Ankunft an der jeweiligen Beobachtungsbohrung konnte an der weiter entfernteren Bohrung Ktzi202 schneller beobachtet werden (bereits ab der dritten Wiederholung, z.B. Schnitt 201 - 202) als in der näheren Bohrung Ktzi200 (statt der ersten Wiederholung erst ab der zweiten, z.B. Schnitt 201 - 200). Dies kann mit den unterschiedlichen Tongehalten der Sandsteine erklärt werden. Im Tiefenbereich des Sandsteinreservoirs sind in Ktzi200 vorwiegend tonhaltige Sandsteine vorhanden, während in der Beobachtungsbohrung Ktzi202 vorwiegend Feinsandsteine mit geringem Tonanteil angetroffen wurden (Norden, 2007a, c). Hohe Tongehalte im Sandstein führen zu deutlich geringeren Widerstandserhöhungen und zeitlich verzögerten Widerstandserhöhungen bei der CO₂-Injektion als niedrigere Tongehalte (Nakatsuka *et al.*, 2010). Somit wird vermutet, dass der höhere Tongehalt in Ktzi200 zu zeitlich verzögerten Widerstandserhöhungen aufgrund der CO₂-Ausbreitung im Reservoir führte als vergleichsweise in Ktzi202.

Aufgrund der angenommenen Schichtaufwölbung in nördlicher Richtung und des ermittelten Verlaufs der Rinnensandsteinschichten im nahen Umfeld der drei Bohrungen in NW-SE Richtung (Kazemeini *et al.*, 2009; Norden & Frykman, 2013), war mit einer prinzipiellen CO₂-Ausbreitung innerhalb des Reservoirs in diese Richtung zu rechnen. Aufgrund der Schichtaufwölbung wurden zwei Tiefenbereiche näher betrachtet. Sie beschreiben die Oberkante der Sandsteinschichten in der Stuttgart-Formation in der Bohrung Ktzi202 in -586 m Tiefe und in der Bohrung Ktzi201 und Ktzi200 in -601 m Tiefe.

Der erste Tiefschnitt zeigt deutlich die CO₂-Ankunft an der entfernteren Bohrung Ktzi202 in der dritten Wiederholungsmessung. Der zweite Tiefschnitt beschreibt die zunehmende Widerstandserhöhung am Injektionspunkt in Ktzi201 von der ersten bis zur dritten Wiederholungsmessung. Es wird ein CO₂-Ausbreitungstrend in nordwestlicher Richtung, also tendenziell nicht in Richtung der beiden Beobachtungsbohrungen, sichtbar. Da die Widerstandszunahme aufgrund der CO₂-Ankunft in Ktzi200 (in der zweiten und dritten Wiederholungsmessung) oberhalb der Tiefenlage der

Sandsteinschicht abgebildet wird (z.B. Schnitt 201 - 200), ist eine zunehmende Widerstandserhöhung in der höheren Tiefenlage ausschließlich in den Vertikalschnitten erkennbar, nicht aber im zweiten Tiefschnitt.

In Ketzin war der Einfluss von anthropogenen Störungen durch gepulste Gasleitungen und elektrische Leitungen in einer Tiefe von rund 650 m nicht vernachlässigbar und erschwerte die Fehlerwertbestimmung und somit die Auswertung der geoelektrischen Messdaten. Eine exakte und umfangreiche Untersuchung der Annahme der Messfehler würde den Inversionsprozess verbessern und zu einer lagerichtigen Abbildung der CO₂-Ausbreitung im Reservoir führen. Auch wenn nur eine Auswertung im Zeitbereich die exaktere Eliminierung von Störsignalen ermöglicht, konnte mit der Auswertung der Messdaten im Frequenzbereich eine hinreichend gute Abbildung der CO₂-Ausbreitung im Reservoir erzielt werden.

5.5 Diskussion zum Ergebnisvergleich zwischen geoelektrischen und anderen Überwachungsmethoden in Ketzin

Eine zentrale wissenschaftliche Fragestellung im Untersuchungsprogramm am Pilotstandort Ketzin und somit dieser Arbeit war es, inwieweit geoelektrische Verfahren zur Überwachung der CO₂-Speicherung eingesetzt und wie gut die CO₂-Ausbreitung im Sandsteinreservoir im Vergleich zu Standardmethoden abgebildet werden kann (Kap. 1). Dazu werden die Ergebnisse der in Ketzin eingesetzten Monitoringmethoden, die jeweils für sich geeignet sind, die CO₂-Speicherung im Untergrund zu überwachen, ansatzweise betrachtet und auf ihr räumliches und zeitliches Auflösungsvermögen eingegangen.

Diese Arbeit lieferte Ergebnisse aus geoelektrischen Bohrlochmessungen (Kap. 4) und kombinierten geoelektrischen Messungen an der Erdoberfläche und im Bohrloch (Kap. 5). Zu den klassischen und somit bereits etablierten Methoden, die in Ketzin Anwendung fanden, gehören v.a. seismische Verfahren im Bohrloch, an der Erdoberfläche und kombinierte seismischen Verfahren (Kap. 3.3.4).

Ein wesentliches Ziel der Überwachung des eingebrachten CO₂ in die Speicherformation war die Beschreibung des Ausbreitungsverhaltens während der CO₂-Speicherung unterhalb der Erdoberfläche (Kap. 1). Somit stellten sich folgende Anforderungen an die verwendeten Methoden: Der Speicherhorizont und die darüber liegenden Deckschichten sollten vor, während und nach der CO₂-Injektion überwacht werden. Die Monitoringmethoden mussten demnach eine geeignete räumliche und zeitliche

Auflösung liefern und ihre Messgrößen sensibel auf die Veränderung der petrophysikalischen Eigenschaften bei der CO₂-Speicherung reagieren.

Bei der CO₂-Injektion verdrängt das elektrische nichtleitende CO₂ das hochleitfähige Formationswasser aus dem Porenraum des gesättigten Sandsteinspeichers. Diese nun gasführende Schicht ist sowohl durch die Erhöhung der elektrischen Widerstände, als auch durch eine zunehmende Reflexionsamplitude und durch eine Geschwindigkeitsverringerung der P-Wellen gekennzeichnet.

Die zeitliche Auflösung wird über die Anzahl der Wiederholungsmessungen und ihren zeitlichen Abstand zueinander beeinflusst. Während Bohrlochmessungen, die in einer oder mehreren Bohrungen stattfanden, eine größere räumliche Auflösung im Beobachtungsraum zwischen den drei Bohrungen besaßen als Messungen von der Erdoberfläche, konnten die großskaligen Messungen an der Erdoberfläche ein größeres Beobachtungsumfeld um die Bohrungen überwachen.

Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse folgender Überwachungsmethoden, die in Ketzin Anwendung fanden, miteinander verglichen:

- seismische und geoelektrische Bohrlochmessungen
- seismische (VSP) und geoelektrische Messungen kombiniert an der Erdoberfläche und im Bohrloch
- seismische 2D-Oberflächenmessungen
- seismische 3D-Oberflächenmessungen
- Bohrlochlogging, Laboruntersuchungen an Kernen, Druck- und Temperaturmessungen
- geochemische Messungen im Bohrloch.

Die seismischen und geoelektrischen **Bohrlochmessungen** sollten die frühe Phase der CO₂-Speicherung überwachen und abbilden, in der sich das CO₂ zwischen den drei Bohrungen ausbreitet.

Die seismischen Sensoren konnten aus Platzgründen von vornherein ausschließlich im Inneren der beiden Beobachtungsbohrungen Ktzi200 und Ktzi202 angewandt werden, da in der Injektionsbohrung Ktzi201 bereits der CO₂-Injektionsstrang eingebaut war. Während die seismische Quelle in die Bohrung Ktzi200 eingelassen wurde, wurden die Hydrophone in Ktzi202 platziert (Kap. 3.3.4). Die beiden ersten Wiederholungsmessungen (07/2008: nach CO₂-Ankunft an Ktzi200, 08/2008: vor der CO₂-Ankunft an Ktzi202) zeigten keine signifikanten Geschwindigkeitsänderungen. Das bedeutet, dass

sich die CO₂-Fahne zu diesen Messzeiten volumenmäßig noch nicht sehr weit durch die Beobachtungsebene Ktzi200 - Ktzi202 ausgebreitet haben konnte. Dies belegen die Änderungen der Reflexionsamplituden bei der Auswertung der Wellencoda, die ausschließlich nahe der Beobachtungsbohrung Ktzi200 auftraten (Lüth *et al.*, 2011).

Der Vorteil der geoelektrischen Bohrlochmessungen gegenüber den seismischen bestand nun darin, dass die Bohrlochelektroden sowohl in den beiden Beobachtungsbohrungen als auch in der Injektionsbohrung selbst permanent installiert wurden (Kap. 4.1). Somit waren kontinuierliche und v.a. kostengünstige Messungen möglich, um die CO₂-Speicherung räumlich unmittelbar ab dem Injektionspunkt (in Ktzi201) und zeitlich unmittelbar mit dem Beginn der Injektion kontinuierlich (teilweise täglich) zu beobachten und zu verfolgen. Die seismischen Bohrlochmessungen in Ketzin lieferten Messdaten nur zu ausgewählten Zeitpunkten. Desweiteren können Elektroden im Gegensatz zu seismischen Sensoren sowohl als Sender (Stromelektroden) als auch als Empfänger (Spannungselektroden) genutzt werden und ermöglichten somit auch geoelektrische Messungen in nur einer Bohrung (z.B. Abb. 4.15, Abb. 4.18).

Während die geoelektrischen Bohrlochmessungen den gesamten Beobachtungsraum zwischen den drei Bohrungen (im Tiefenbereich der Bohrlochelektroden) überwachen konnten (Abb. 4.28, Abb. 4.29), beschränkten sich die seismischen Bohrlochmessungen auf die Beobachtungsebene zwischen den beiden Beobachtungsbohrungen. Dank der geringen Schrittweite der seismischen Quelle und der Hydrophone von 1 m konnte mit den seismischen Bohrlochmessungen diese Schnittebene theoretisch hochauflösender überwacht werden, als es bei geoelektrischen Bohrlochmessungen mit einem Elektrodenabstand von rund 10 m möglich wäre. Dennoch konnten keine signifikanten Geschwindigkeitsverringerungen gemessen werden (Lüth *et al.*, 2011). Andererseits konnte mit den geoelektrischen Bohrlochmessungen eine deutliche Zunahme des elektrischen Widerstandes innerhalb des Reservoirs, insbesondere im bohrlochnahen Bereich der Beobachtungsbohrung Ktzi202, nachgewiesen werden (Abb. 4.29).

Die seismischen und geoelektrischen **Messungen kombiniert an der Erdoberfläche und im Bohrloch** sollten den Beobachtungsraum der Bohrlochmessungen im Umkreis der drei Bohrungen erweitern.

Während auf seismischen sternförmig angelegten Profillinien um die Bohrungen mit einer seismischen Quelle angeregt wurde, wurde in der Bohrung Ktzi202 gemessen (VSP-Messungen, Kap. 3.3.4). Sie konnten den Nahbereich der Beobachtungsbohrung

Ktzi202 besser auflösen als die seismischen 2D-Oberflächenmessungen und erweitern die Beobachtungsebene der seismischen Bohrlochmessungen. Die erste VSP-Wiederholungsmessung (02/2011) zeigte deutliche Änderungen in der Reflexionsamplitude und der P-Wellengeschwindigkeit (Götz, 2013).

Aufgrund der angenommenen Schichtaufwölbung in nördlicher Richtung und des ermittelten Verlaufs der Rinnensandsteinschichten im nahen Umfeld der drei Bohrungen in NW-SE Richtung (Kazemeini *et al.*, 2009; Norden & Frykman, 2013), war mit einer prinzipiellen CO₂-Ausbreitung innerhalb des Reservoirs in diese Richtung zu rechnen (Kap. 3.2.4). Da die ursprünglich geplante Injektionsbohrung aus technischen Gründen vom Osten der Anordnung in den Westen verlegt werden musste (Kap. 4.1), bestand das Risiko, dass sich das CO₂ nicht in Richtung der beiden Beobachtungsbohrungen ausbreitet. Um solch eine mögliche Ausbreitung dennoch abzubilden, wurden kombinierte geoelektrische Messungen auf zwei Kreisprofilen um die Bohrungen durchgeführt (Kap. 5). An den Oberflächendipolen wurden elektrische Ströme in den Untergrund injiziert, während an den restlichen Oberflächendipolen, sowie in allen drei Bohrungen die Potentialdifferenzen gemessen wurden. Der Beobachtungsraum der kombinierten geoelektrischen Messungen erweiterte den Beobachtungsraum der geoelektrischen Bohrlochmessungen (innerhalb der drei Bohrungen) um ihren Außenbereich. Die Messergebnisse bestätigen den bevorzugten CO₂-Ausbreitungstrend in nordwestlicher Richtung (Abb. 5.8). Das erklärt, dass die CO₂-Ausbreitung im Umfeld der beiden Beobachtungsbohrungen mit den seismischen und geoelektrischen Bohrlochmessungen nicht bzw. räumlich nur begrenzt abgebildet werden konnte.

Die **seismischen 2D-Oberflächenmessungen** auf sternförmigen Profillinien um die Bohrungen zeigten in der ersten Wiederholungsmessung (09/2009) keine wesentlichen Amplitudenänderungen (Bergmann *et al.*, 2011). Da die seismischen Profile in mindestens 150 m Entfernung zu den Bohrungen (außerhalb des Bohrplatzes) verliefen, konnte das injizierte CO₂ in der Anfangsphase nicht aufgelöst werden, da es sich bis zu diesem Zeitpunkt nur bohrlochnah ausbreitete. Die zweite Wiederholungsmessung (02/2011) zeigte deutlichere Amplitudenänderungen und konnte eine Vorzugsrichtung der CO₂-Ausbreitung nach Westen nachweisen. Die räumliche Ausdehnung des injizierten CO₂ wurde allerdings mit einem (scheinbar) geringeren Volumen abgebildet, da das Auflösungsvermögen geringer war als das der 3D-Oberflächenmessungen (Ivandić *et al.*, 2012).

Die **seismischen 3D-Oberflächenmessungen** auf gerasterten Profillinien lieferten vor Bohrbeginn (im Umfeld von 12 km²) einen strukturellen Aufbau der Ketzin-Antiklinale und möglicher Fließwege im Reservoir. Des Weiteren lieferten sie eine detaillierte Untergrundabbildung des geplanten Bohrfeldes für die Bohrphase (Juhlin *et al.*, 2007; Kap. 3.2). Die ermittelten Amplitudendifferenzen der ersten Wiederholungsmessung (10/2009) im Vergleich zur Nullmessung (2005) mit Werten > 0,3 ergaben eine räumliche CO₂-Ausdehnung von rund 350 m in W-E-Richtung, von rund 250 m in S-N-Richtung und eine Schichtdicke von 5 - 20 m. Es konnten Volumenabschätzungen mit einer Genauigkeit von rund 93 - 95 % erzielt werden (Ivanova *et al.*, 2012, Ivandic *et al.*, 2015). Die zweite Wiederholungsmessung (2012) ergab eine fortgeschrittene räumliche CO₂-Ausdehnung von bereits rund 550 m in W-E-Richtung, von rund 400 m in S-N-Richtung und eine Schichtdicke von 10 - 30 m (Ivandic *et al.*, 2015). Die Volumenabschätzungen zeigten eine Abweichung um 15 % von der CO₂-Injektionsmenge, die mithilfe von geochemischen Simulationen (z.B. Kempka & Kühn, 2013) mit CO₂-Lösungserscheinungen im Formationswasser erklärt werden konnten. In den Deckschichten konnten keine Amplitudenänderungen gemessen werden, was die Dichtheit des Speichers belegte (Bergmann *et al.*, 2016a).

Aufgrund der hohen Überdeckung (außerhalb der drei Bohrungen) konnten die seismischen 3D-Oberflächenmessungen ein großes Umfeld (rund 7 km²) um die drei Bohrungen trotz hohem Umgebungsrauschen gut auflösen und die räumliche Ausdehnung der CO₂-Ausbreitung im Reservoir bestimmen, während die gemessenen Widerstandserhöhungen der kombinierten geoelektrischen Messungen ausschließlich einen Ausbreitungstrend abschätzen konnten (Kap. 5.4). Eine verbesserte Auflösung der kombinierten geoelektrischen Messungen konnte nachweislich durch die Kombination mit seismischen 3D-Oberflächendaten auf der Grundlage einer strukturbasierten Inversion erzielt werden. Der Grenzbereich zwischen dem Speichergestein und den Deckschichten konnte so genauer abgebildet werden (Bergmann *et al.*, 2014).

CO₂-Sättigungsbestimmungen, Widerstandsmessungen, sowie Druck- und Temperaturmessungen im Bohrloch (Bohrlochlogging, Kap. 3.3.7) dienten dem Abgleich der geophysikalischen Monitoringdaten und wurden zur Interpretation und Diskussion der seismischen und geoelektrischen Ergebnisse herangezogen.

Die **CO₂-Sättigungsbestimmungen** in den drei Bohrungen belegten, dass CO₂ in den unzementierten Bereichen oberhalb des Reservoirs (Ringraum) eingedrungen war

(Bergmann *et al.*, 2012) und zu Erhöhungen des elektrischen Widerstandes auch an Bohrlochelektroden außerhalb des Sandsteinreservoirs führte (Kap. 4.7).

Die vor Beginn der CO₂-Injektion durchgeführten **Widerstands-Bohrlochmessungen** in allen drei Bohrungen dienten der Korrelation der gemessenen geoelektrischen Bohrlochmessungen (Kap. 4.5).

Die zeitliche Änderung der elektrischen Widerstände konnte mit der CO₂-Injektionsrate und dem **Reservoirdruck** in der Injektionsbohrung erfolgreich korreliert und erklärt werden (Kap. 4.5.3).

Die, in den Bohrungen Ktzi200, Ktzi201 und Ktzi202 permanent installierten, faseroptischen Temperatursensorkabel ermöglichten eine wertvolle Echtzeitüberwachung verschiedener Transportprozesse im Untergrund (Giese *et al.*, 2009). Temperaturänderungen können dabei u.a. aus Temperaturunterschieden zwischen dem injizierten CO₂ und dem Speichergestein, aber auch aus Volumenänderungen aufgrund von Druckänderungen oder aus Lösungsvorgängen und Phasenübergängen resultieren. Des Weiteren ermöglichten die **Temperaturmessungen** die Überwachung des Zementationsverlaufes und dessen Qualitätsbeurteilung während der Installationsphase (Henninges & Brandt, 2007; Abb. 3.8 und Abb. 3.9, Kap. 3.3.5).

Porositäts- und Permeabilitätsuntersuchungen an Sandsteinen aus dem Reservoirbereich sollten in **Labormessungen** vor Bohrbeginn eine Abschätzung geeigneter CO₂-Injektionstiefen liefern und die Tiefenabhängigkeit dieser Gesteinseigenschaften untersuchen. Langzeit-Durchströmungsexperimente mit CO₂ unter in-situ Bedingungen an Kernen aus der Bohrung Ktzi202 lieferten wichtige Erkenntnisse zum CO₂-Einfluss auf die petrophysikalischen Gesteinsparameter und damit auf die seismische Geschwindigkeit und den elektrischen Widerstand (Kummerow & Spangenberg, 2011; Kap. 3.3.2). Beim Durchströmen der salzwassergesättigten Sandsteinprobe mit elektrisch nicht-leitendem CO₂ stieg der elektrische Widerstand mit abnehmender Wassersättigung im Porenraum von 0,54 Ωm auf 1,73 Ωm an und nahm beim erneuten Durchströmen mit der Salzlauge wieder ab (Kummerow & Spangenberg, 2011). Die geoelektrischen Messungen im Bohrloch zeigten mit dem Beginn der CO₂-Injektion die Erhöhung der Messwerte von rund 0,5 Ωm auf über 2 Ωm im bohrlochnahen Bereich der Injektionsbohrung (Kap. 4.5.3) und stimmten gut mit den im Labor bestimmten Widerstandswerten überein.

Direkte **geochemische Untersuchungen** mit Gasmembransensoren in beiden Beobachtungsbohrungen waren neben indirekten geophysikalischen Messungen zur Beobachtung des CO₂-Injektionsprozesses besonders wichtig. Die Geochemie war die einzige direkte Methode zur kontinuierlichen in-situ Messung des injizierten CO₂ und seiner Ausbreitung (Zimmer *et al.*, 2011b; Kap. 3.3.6). Die chemisch gemessenen (Abb. 3.10b; Ktzi200: 15.07.08, Ktzi202: 22.03.09) und geophysikalisch bestimmten Ankunftszeiten an den Beobachtungsbohrungen (z.B. Abb. 4.19 und Abb. 4.22) stimmten gut mit den modellierten Zeiten überein (Kap. 4.5). Das injizierte CO₂ breitete sich in den erwarteten Sandsteinbereichen des heterogenen Speicherreservoirs mit den modellierten Geschwindigkeiten von rund 0,4 bis 2,3 Meter pro Tag aus (Kempka & Kühn, 2013).

Weder geoelektrische Messungen noch andere Überwachungsmethoden konnten CO₂-Aufstiegswege vom Reservoir durch die Deckschichten oder entlang der Bohrung bis an die Erdoberfläche nachweisen. Das Reservoir war dicht abgeschlossen. Die salinen Sandsteinschichten konnten in Ketzin zur sicheren CO₂-Speicherung genutzt werden.

Für den Pilotstandort Ketzin lässt sich zusammenfassen, dass die Anwendung verschiedener Monitoringmethoden eine Vielzahl an sich ergänzenden Informationen zum CO₂-Ausbreitungsprozess lieferte und somit zu einer optimalen Abbildung der CO₂-Speicherung im Untergrund führte. Der Einsatz geoelektrischer Verfahren ist auf der Grundlage der diskutierten Aspekte dabei im Monitoringprogramm ausdrücklich zu empfehlen. Um Monitoringkosten einzusparen und damit den Messaufwand im Allgemeinen zu verringern, ist die Installation von permanenten Messsensoren vielversprechend. Die Anwendung von permanent installierten Bohrlochelektroden in Ketzin bestätigte dies. Die gewonnenen Erkenntnisse sind nicht nur für zukünftige internationale CO₂-Speicherungsprojekte relevant, sondern können auch auf andere Projekte zur Überwachung von Fluidinjektionen oder Fluidproduktionen übertragen werden.

6. Zusammenfassung

Am Pilotstandort Ketzin in Brandenburg wurde die wissenschaftlich begleitete CO₂-Speicherung in poröse Sandsteine der Stuttgart-Formation in rund 640 m Tiefe mittels eines umfangreichen Monitoringprogramms untersucht. Die vorliegende Arbeit leistet einen wissenschaftlichen Beitrag zur Erprobung der Anwendbarkeit geoelektrischer Verfahren bei der Überwachung der CO₂-Speicherung. Geoelektrische Messungen erfassen dabei den elektrischen Widerstand des Untergrundes. Bei der CO₂-Injektion wird das vorhandene elektrisch hochleitfähige Formationswasser durch das hochohmige Speichergas verdrängt und verursacht eine messbare Widerstandserhöhung. Eine geoelektrische Überwachung ist somit möglich (Kap. 2.3.4). Ketzin bot aufgrund seiner erwarteten Geologie, seiner vorhandenen Infrastruktur und seiner ehemaligen sicheren Untergrundspeichernutzung, sowie der Prognostizierung guter Speichereigenschaften gute Voraussetzungen für eine erfolgreiche CO₂-Speicherung und Überwachung im salinen Sandsteinaquifer (Kap. 3.2.5).

Es ergaben sich folgende konkreten Fragestellungen: Inwieweit kann die CO₂-Speicherung in Ketzin mithilfe geoelektrischer Verfahren überwacht, sowie ihre räumliche und zeitliche Ausbreitung im Reservoir abgebildet werden? Wie kann ein geoelektrisches Monitoring technisch und wissenschaftlich realisiert werden? Die Herausforderungen dieser Arbeit umfassten somit auch die geoelektrische Begleitung der Installation, des Einbaus sowie der Zementation der Bohrlochelektroden (technische Realisierung der Messvoraussetzungen). Für die wissenschaftliche Umsetzung der Überwachung der CO₂-Injektionsphasen wurden neben geoelektrischen Messungen in einer und in mehreren der drei Bohrungen, auch kombinierte geoelektrische Messungen an der Erdoberfläche und in den Bohrungen angewandt.

Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse und Erkenntnisse, die am Ende der jeweiligen Kapitel ausführlich dargestellt sind, für die drei Phasen des CO₂-Injektionsprozesses noch einmal kurz zusammengefasst.

Die geoelektrischen Messungen im Bohrloch wurden mit der Geoelektrikapparatur GeoTom durchgeführt. Sie wurden im Rahmen des von mir geleiteten Teilprojektes in Ketzin für die jeweilige Problemstellung angepasst und stellten keinen Standard dar.

Während der Installation der Bohrlochelektroden **(Phase I: Installation und Zementation der Bohrlochelektroden)** lieferten elektrische Isolationsmessungen

Ankopplungswiderstände im Megaohmbereich. Sie bestätigten eine unbeschädigte Isolierung der Außenbeschichtung der Edelstahlrohre (Kap. 4.2.2).

Elektrische Ankopplungsmessungen zwischen benachbarten Elektroden unter Tage lieferten Ankopplungswiderstände im einstelligen Ohmbereich. Sie bestätigten eine elektrische Verbindung und damit den erfolgreichen Anschluss aller Elektroden an das jeweilige Messkabel. Alle Elektroden konnten erfolgreich installiert und voll funktionstüchtig ins Bohrloch eingebaut werden. Die Messvoraussetzungen waren somit erfüllt (Kap. 4.2.3).

Die elektrischen Ankopplungswiderstände lagen vor und während der Zementation einer Beobachtungsbohrung zeitlich unverändert im einstelligen Ohmbereich. Sie ließen darauf schließen, dass keine der unteren Elektroden während des Zementationsprozesses wie vorgesehen zementiert wurde (Kap. 4.2.4). Zementlog- und Temperaturmessungen bestätigten zu einem späteren Zeitpunkt die geringere Zementationshöhe und damit eine Nichtzementierung der unteren Bohrlochelektroden in der Bohrung Ktzi200 (Henninges *et al.*, 2008).

In **Phase II (vor dem eigentlichen Start der CO₂-Injektion)** wurden die CO₂-Testinjektion (20.06.08) und die CO₂-Injektion mit geringer Rate (24.06. bis 29.06.08) erfolgreich mit geoelektrischen Messungen im Bohrloch überwacht.

Die nach dem Elektrodeneinbau (03/07 - 08/07) durchgeführten elektrischen Ankopplungsmessungen ergaben in allen drei Bohrungen Ankopplungswiderstände von anfangs rund 150 Ω , die ab Ende 09/2007 aufgrund von Salinitätsänderung im bohrlochnahen Umfeld auf rund 75 Ω sanken. Nachdem sich das komplexe System im Reservoir stabilisiert hatte, stabilisierten sich auch die gemessenen elektrischen Ankopplungswiderstände an den Bohrlochelektroden. Die anschließende Widerstandserhöhung (90 Ω bis 135 Ω) ab dem 20.06.08 im bohrlochnahen Bereich der Injektionsbohrung Ktzi201 ließ sich daher im Folgenden zweifellos dem CO₂-Injektionsprozess zuordnen (Kap. 4.4.1). Die Widerstandserhöhung wurde durch die CO₂-Testinjektion, die anschließende Stickstoff-Injektion (Vorinjektionsmaßnahme) und die CO₂-Injektion mit geringer Rate verursacht. Die gemessene Widerstandserhöhung oberhalb des Injektionspunktes ist damit zu erklären, dass diese Bereiche unzementiert blieben. Somit war der CO₂-Aufstieg im Ringraum oberhalb des Injektionspunktes möglich. Die Daten der CO₂-Sättigungsbestimmungen belegten das Vorhandensein von CO₂ im unzementierten Bereich oberhalb des Injektionspunktes (Bergmann *et al.*, 2012).

Die geoelektrischen Messungen einer festen Elektrodenanordnung in der Injektionsbohrung zeigten mit dem Beginn der CO₂-(Test)Injektion die Erhöhung der Messwerte von rund 0,5 Ωm auf über 2 Ωm im bohrlochnahen Bereich (Kap. 4.4.2). Ähnliche Widerstandswerte wurden auch im Labor in CO₂-Durchströmungsexperimenten an Gesteinsproben aus den Ketziner Bohrungen unter in-situ Bedingungen ermittelt (Kummerow & Spangenberg, 2011). Die zeitliche Änderung der elektrischen Widerstände konnte mit der CO₂-Injektionsrate und dem Reservoirdruck in der Injektionsbohrung erfolgreich korreliert und erklärt werden.

Das 3D-Inversionsergebnis der geoelektrischen Messungen in allen drei Bohrungen vor dem CO₂-Injektionsbeginn ließ ebenfalls auf eine leitfähige Schicht (rund 0,5 Ωm) in der Tiefe der Speicherformation zwischen der Injektionsbohrung Ktzi201 und der naheliegenden Beobachtungsbohrung Ktzi200 schließen (Kap. 4.4.3). Diese Zone erhöhter Leitfähigkeit wurde durch die 16 m - 19 m mächtigen, formationswasser-gesättigten Sandsteinschichten erzeugt und an Hand von Laborwerten bestätigt. Im bohrlochnahen Bereich der weiter entfernten Beobachtungsbohrung Ktzi202 lag der spezifische elektrische Widerstand dieser Schicht (lediglich 9 m mächtig) höher und erreicht Werte von über 2 Ωm. Mittels geoelektrischer Messungen konnte in allen drei Bohrungen der geologische Speicherhorizont abgebildet und hinsichtlich seiner elektrischen Eigenschaften charakterisiert werden. Es wurden reproduzierbare Messwerte gewonnen.

Sehr geringe CO₂-Mengen zu Beginn der CO₂-Testinjektion und bei der Injektion mit geringer Rate konnten mit den geoelektrischen Messungen in allen drei Bohrungen nicht aufgelöst werden, da die injizierte CO₂-Gesamtmenge zu diesem Zeitpunkt für eine messbare Widerstandserhöhung zu gering war.

In **Phase III (während der CO₂-Injektion)** wurden die CO₂-Injektion mit erhöhter Rate (30.06.08 bis 13.05.09) und die Ausbreitung des CO₂ im Speichergestein erfolgreich mit geoelektrischen Messungen überwacht. Das injizierte CO₂ stieg aufgrund seiner geringeren Dichte gegenüber der des Porenwassers im Reservoir auf und sammelte sich unterhalb der undurchlässigen Deckschicht aus Tonsteinabfolgen. Das CO₂ breitete sich folglich entlang der Grenze zur darüber liegenden Deckschicht im Speichergestein um die Injektionsbohrung aus.

Elektrische Ankopplungsmessungen ermöglichten die zeitliche Bestimmung der CO₂-Ankunft an den beiden Beobachtungsbohrungen anhand der dort gemessenen Widerstandserhöhungen (Kap. 4.5.1). Sie stimmten mit den Ergebnissen numerischer

Simulationen zum zeitlichen und räumlichen Verhalten des injizierten CO₂ mit modellierten Geschwindigkeiten (Kempka & Kühn, 2013) und mit den Ergebnissen direkter chemischer Messungen in den beiden Beobachtungsbohrungen (Zimmer *et al.*, 2011b) überein.

Die Bereiche zwischen dem CO₂-Injektionspunkt und der CO₂-Front ließen sich im zeitlichen Verlauf der CO₂-Injektion mit den geoelektrischen Messungen in allen drei Bohrungen unterschiedlich gut auflösen (Kap. 4.5.3). Je höher die CO₂-Injektionsrate war und je kontinuierlicher das CO₂ injiziert wurde, desto höher und stabiler sind die Druckverhältnisse und die elektrischen Widerstände im bohrlochnahen Bereich der Injektionsbohrung Ktzi201 und desto besser ließen sich diese Zwischenbereiche geoelektrisch abbilden.

Während die seismischen Bohrlochmessungen eine hochauflösende Abbildung der Schnittebene zwischen den beiden Beobachtungsbohrungen (allerdings ohne signifikanten Geschwindigkeitsverringerungen) lieferten (Lüth *et al.*, 2011), konnten die geoelektrischen Bohrlochmessungen in allen drei Bohrungen durchgeführt werden. Insbesondere im bohrlochnahen Bereich der Beobachtungsbohrung Ktzi202 konnten sie dennoch eine Widerstandszunahme nachweisen (Kap. 4.5.3)

Geoelektrische Messungen, die kombiniert an der Erdoberfläche und in den Bohrungen vor und während der CO₂-Injektion (bis 04/09) stattfanden, verbesserten die Auflösung in der Tiefe. Somit konnte kostengünstig auch ohne weitere Beobachtungsbohrungen ein größeres räumliches Umfeld um die Injektionsbohrung überwacht werden, als dies mit den Messungen in den Bohrungen möglich war. Darüber hinaus lieferten die kombinierten geoelektrischen Messungen wichtige Erkenntnisse zum allgemeinen CO₂-Ausbreitungstrend in nordwestliche Richtung, also tendenziell nicht in Richtung der beiden Beobachtungsbohrungen. Die anisotrope Ausbreitung außerhalb des Beobachtungsraumes der Bohrlochmessanordnung konnte trotz anthropogener Störeinflüsse nachgewiesen und beschrieben werden (Kap. 5.3).

Aufgrund der hohen Überdeckung (außerhalb der drei Bohrungen) konnten die seismischen 3D-Oberflächenmessungen ein weiträumigeres Umfeld um die drei Bohrungen gut auflösen und die räumliche Ausdehnung der CO₂-Ausbreitung im Reservoir bestimmen (Ivanova *et al.*, 2012, Ivandic *et al.*, 2015), während die gemessenen Widerstandserhöhungen der kombinierten geoelektrischen Messungen ausschließlich einen Ausbreitungstrend abschätzen konnten (Kap. 5.4). Eine verbesserte Auflösung der kombinierten geoelektrischen Messungen konnte nachweislich durch die Kombination mit seismischen 3D-Oberflächendaten auf der

Grundlage einer strukturbasierten Inversion erzielt werden (Bergmann *et al.*, 2014). Der Grenzbereich zwischen dem Speichergestein und den Deckschichten konnte so genauer abgebildet werden.

Weder geoelektrische Messungen noch andere Überwachungsmethoden konnten CO₂-Aufstiegswege vom Reservoir durch die Deckschichten oder entlang der Bohrung bis an die Erdoberfläche nachweisen. Das Reservoir war dicht abgeschlossen. Die salinen Sandsteinschichten konnten in Ketzin zur sicheren CO₂-Speicherung genutzt werden (Kap. 5.5).

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass Ketzin ein wichtiges Pilotprojekt zur Erprobung der Anwendbarkeit geoelektrischer Überwachungsverfahren für eine sichere CO₂-Speicherung im tiefen Untergrund ist. Die praktischen Erfahrungen dieser Arbeit zeigen, dass die Geoelektrik zwar der geforderten Zuverlässigkeit stand hält, aber beispielsweise nicht in allen Bereichen eine optimale räumliche Auflösung besitzt. Mittelfristig müssen geoelektrische Messanordnungen besser an die geologische Situation des Standortes angepasst, sowie die Strategien zur Auswertung verfeinert werden. Die Geoelektrik wird bei zukünftigen kommerziell genutzten CO₂-Speicherungen die konventionellen Standardverfahren nicht ersetzen können, jedoch kombiniert mit anderen geophysikalischen Überwachungsmethoden eine optimale Abbildung der CO₂-Speicherung und eine verlässliche Überwachung geologischer Untergrund-speicher erzielen. Der Einsatz geoelektrischer Verfahren ist auf der Grundlage der diskutierten Aspekte dabei im Monitoringprogramm von Ketzin ausdrücklich zu empfehlen. Trotz dass sich in Deutschland aufgrund der aktuellen politischen Lage vermutlich kaum eine kommerziell genutzte CO₂-Speicherung etablieren wird, sind die gewonnenen Erkenntnisse nicht nur für zukünftige CO₂-Speicherungsprojekte relevant, sondern können auch auf andere Projekte zur Überwachung von Fluidinjektionen oder Fluidproduktionen übertragen werden.

Literaturverzeichnis

- Ajo-Franklin, J. B., Peterson, J., Doetsch, J., Daley, T. M., 2013. High-resolution characterization of a CO₂ plume using crosswell seismic tomography: Cranfield, MS, USA. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, doi: 10.1016/j.ijggc.2012.12.018.
- Alnes, H., Eiken O., Stenvold, T., 2008. Monitoring gas production and CO₂ injection at the Sleipner field using time-lapse gravimetry. *Geophysics*, 73, 6, 155-161, doi: 10.1190/1.2991119.
- Archie, G. E., 1942. The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics. *Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers*, 146, 54-62, doi: 10.2118/942054-G.
- Arts, R.J., Meekes, J.A.C., Brouwer, J.H., van der Werf, M., Noorlandt, R.P., Paap, B., Visser, W., Vandeweyer, V., Lüth, S., Giese, R., Maas, J., 2011. Results of a monitoring pilot with a permanent buried multicomponent seismic array at Ketzin. *Energy Procedia*, 4, 3588-3595, doi: 10.1016/j.egypro.2011.02.288.
- Atkins, P. W., de Paula, J., 2013. Physikalische Chemie. *Wiley-VCH*, Weinheim. ISBN 978-3-527-33247-2.
- Barker, R. D., 1989. Depth of investigation of collinear symmetrical four-electrode arrays. *Geophysics*, 54, 1031-1037, doi: 10.1190/1.1442728.
- Bauer, S., Borm, G., Class, H., Erzinger, J., Fichter, C., Gerling, J. P., Görke, U.-J., Hoth, N. T., Kempka, T., Knopf, S., Kolditz, O., Kühn, M., May, F., Meyer, R., Möller, F., Park, C.-H., Reinhold, K., Reinicke, K. M., Schilling, F. R., Stroink, L., Teodoriu, C., Tesmer, M., Wang, W., Würdemann, H., CLEAN-PARTNER, CO₂SINK-Group, 2009. Die dauerhafte geologische Speicherung von CO₂ in Deutschland – Aktuelle Forschungsergebnisse und Perspektiven. *GEOTECHNOLOGIEN Science Report*, No. 14, ISBN 1619-7399.
- Baumann, G., 2013. Determination of displacement and evaporation/precipitation processes via Pulsed Neutron-Gamma (PNG) monitoring for CO₂ storage operations. *Dissertation*, Technische Universität Berlin, URN: urn:nbn:de:kobv:83-opus4-41968.
- Baumann, G., Henninges, J., De Lucia, M., 2014. Monitoring of saturation changes and salt precipitation during CO₂ injection using pulsed neutron-gamma logging at the Ketzin site. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 28, 134-146, doi:10.1016/j.ijggc.2014.06.023.
- Bender, F., 1984. Angewandte Geowissenschaften. Band III. Geologie der Kohlenwasserstoffe, Hydrogeologie, Ingenieurgeologie, Angewandte Geowissenschaften in Raumplanung und Umweltschutz. *Ferdinand Enke Verlag*, Stuttgart.
- Bender, F., 1985. Angewandte Geowissenschaften. Band II. Methoden der Angewandten Geophysik und mathematische Verfahren in den Geowissenschaften. *Ferdinand Enke Verlag*, Stuttgart.
- Bentham, M., Kirby, G., 2005. CO₂ Storage in Saline Aquifers. *Oil & Gas Science and Technology - Revue d'IFP Energies nouvelles*, 60, 3, 559-567, doi: 10.2516/ogst:2005038.
- Bergen van, F., 2009. Effect of coal matrix swelling on enhanced coalbed methane production. A field and laboratory study. *PhD thesis*, Utrecht University, ISBN: 978-90-5744-176-9.

- Bergmann, P., Lengler, U., Schmidt-Hattenberger, C., Giese, R., Norden, B., 2010. Modelling the geoelectric and seismic reservoir response caused by carbon dioxide injection based on multiphase flow simulation: Results from the CO₂SINK project. *Chemie der Erde*, 70, 3, 173-183, doi: 10.1016/j.chemer.2010.05.007.
- Bergmann, P., Yang, C., Lüth, S., Juhlin, C., Cosma, C., 2011. Time-lapse processing of 2D seismic profiles with testing of static correction methods at the CO₂ injection site Ketzin (Germany). *Journal of Applied Geophysics*, 75, 124-139, doi: 10.1016/j.jappgeo.2011.05.005.
- Bergmann, P., Schmidt-Hattenberger, C., Kiessling, D., Rücker, C., Labitzke, T., Henningses, J., Baumann, G., Schütt, H., 2012. Surface-downhole electrical resistivity tomography applied to monitoring of CO₂ storage at Ketzin, Germany. *Geophysics*, 77, 6, B253-B267, doi: 10.1190/geo2011-0515.1.
- Bergmann, P., 2012. Time-lapse seismic and electrical resistivity tomography combined for monitoring of the CO₂ storage site. Ketzin, Germany, *Dissertation*, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. URN: urn:nbn:de:gbv:8-diss-117126.
- Bergmann, P., Ivandic, M., Norden, B., Rücker, C., Kiessling, D., Lüth, S., Schmidt-Hattenberger, C., Juhlin, C., 2014. Combination of seismic reflection and constrained resistivity inversion with an application to 4D imaging of the CO₂ storage site, Ketzin, Germany. *Geophysics*, 97, 2, B37-B50, doi: 10.1190/geo2013-0131.
- Bergmann, P., Diersch, M., Götz, J., Ivandic, M., Ivanova, A., Juhlin, C., Kummerow, J., Liebscher, A., Lüth, S., Meekes, S., Norden, B., Schmidt-Hattenberger, C., Wagner, F. M., Zhang, F., 2016a. Review on geophysical monitoring of CO₂ injection at Ketzin, Germany. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 139, 112-136, doi: 10.1016/j.petrol.2015.12.007.
- Bergmann, P., Schmidt-Hattenberger, C., Labitzke, T., Wagner, F. M., Just, A., Flechsig, C., Rippe, D., 2016b. Fluid injection monitoring using electrical resistivity tomography - Five years of CO₂ injection at Ketzin, Germany. *Geophysical Prospecting*, doi: <http://doi.org/10.1111/1365-2478.12426>.
- Bevc, D., Morrison, H. F., 1991. Borehole-to-surface electrical resistivity monitoring of a salt water injection experiment. *Geophysics*, 56, 6, 769-777, doi: 10.1190/1.1443094.
- Beutler, G., Häusser, I., 1982. Über den Schilfsandstein in der DDR. *Zeitschrift für Geologische Wissenschaften*, 10, 511- 525.
- Binley, A., Daily, W., Ramirez, A., 1997. Detecting Leaks from Environmental Barriers Using Electrical Current Imaging. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 2, 1, 11-19.
- BLM - Gesellschaft für Bohrlochmessungen mbH, 2007. Widerstandsbohrlochmessungen in den Bohrungen Ktzi200 und Ktzi202. *CO₂SINK- interne Daten*.
- Borm, G., Förster, A., 2005. Tiefe salzwasserführende Aquifere - eine Möglichkeit zur geologischen Speicherung von CO₂. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen - Zeitschrift für Energiewirtschaft, Recht, Technik und Umwelt*, 8, 15-20.
- Bracke, G., Charlier, F., Geckeis, H., Harms, U., Heidbach, O., Kienzler, B., Liebscher, A., Müller, B., Prevedel, B., Röckel, T., Schilling, F., Sperber, A., 2016. K-Mat 52: Gutachten Tiefe Bohrlöcher. *Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH*, 02-2016, http://www.bundestag.de/blob/413166/73c4148a71bb98611305958662204e23/kmat_52-data.pdf.

- Breen, S.J., Carrigan, C.R., LaBrecque, D.J., Detwiler, R.L., 2012. Bench-scale experiments to evaluate electrical resistivity tomography as a monitoring tool for geologic CO₂ sequestration. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 9, 484-494, doi: 10.1016/j.ijggc.2012.04.009.
- Brunner, I., Friedel, S., Jacobs, F., Danckwardt, E., 1999. Investigation of a Tertiary maar structure using three-dimensional resistivity imaging. *Geophysical Journal International*, 136, 3, 771-780, doi: 10.1046/j.1365-246x.1999.00770.x.
- Brunner, I., 2001. Beiträge zur geoelektrischen Potentialtomographie für die Ermittlung von Leitfähigkeitsunterschieden im Untergrund. *Dissertation*, Universität Leipzig, *Shaker Verlag Aachen*, ISBN 978-3-8265-8663-7.
- Bryant, I. D., Chen, M.-Y., Raghuraman, B., Raw, I., Delhomme, J.-P., Chouzenoux, C., Pohl, D., Manin, Y., Rioufol, E., Oddie, G., Swager, D., Smith, J., 2001. Utility and Reliability of Cemented Resistivity Arrays in Monitoring Waterflood of the Mansfield Sandstone, Indiana, USA. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, New Orleans, Louisiana, USA, doi: 10.2118/71710-MS.
- Bryant, I. D., Chen, M.-Y., Raghuraman, B., Raw, I., Delhomme, J.-P., Chouzenoux, C., Pohl, D., Manin, Y., Rioufol, E., Oddie, G., Swager, D., Smith, J., 2002. An Application of Cemented Resistivity Arrays To Monitor Waterflooding of the Mansfield Sandstone, Indiana, U.S.A. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 5, 6, 447-454, doi: 10.2118/81752-PA.
- Buja, H.-O., 2011. Handbuch der Tief-, Flach-, Geothermie- und Horizontalbohrtechnik: Grundlagen und Anwendung: Bohrtechnik in Grundlagen und Anwendung. *Vieweg+Teubner Verlag*, Wiesbaden, ISBN: 3834812781.
- Butsch, R., Brown, A. L., Bryans, B., Kolb, C., Hovorka, S., 2013. Integration of well-based subsurface monitoring technologies: Lessons learned at SECARB study, Cranfield, MS. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, doi: 10.1016/j.ijggc.2013.06.010.
- Butz, T., 2011. Fouriertransformation für Fussgänger. *Vieweg+Teubner Verlag*, Wiesbaden, ISBN: 3834809462.
- Carrigan, C. R., Ramirez, A. L., Newmark, R. L., Aines, R., Friedman, S. J., 2009. Application of ERT for tracking CO₂ plume growth and movement at the SECARB Cranfield site, 8th *Annual Conference on Carbon Capture & Sequestration*, Pittsburgh, PA, USA.
- Carrigan, C. R., Yang, X., LaBrecque, D. J., Larsen, D., Freeman, D., Ramirez, A. L., Daily, W., Aines, R., Newmark, R., Friedmann, J., Hovorka, S., 2013. Electrical resistance tomographie monitoring of CO₂ movement in deep geologic reservoirs. *International Journal of Greenhouse Gas and Control*, doi: 10.1016/j.ijggc.2013.04.016.
- Carter, R. W., Spikes, K. T., 2013. Sensitivity analysis of Tuscaloosa sandstones to CO₂ saturation, Cranfield field, Cranfield, MS. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, doi: 10.1016/j.ijggc.2013.01.006.
- Chadwick, R. A., Arts, R., Bernstone, C., May, F., Thibeau, S., Zweigel, P., 2007. Best-Practice for the Storage of CO₂ in Saline Aquifers, Observations and guidelines from the SACS and CO2STORE projects, www.co2store.org.
- Christensen, N. B., Sherlock D., Dodds, K., 2006. Monitoring CO₂ injection with cross-hole electrical resistivity tomography. *Exploration Geophysics* 37, 1, 44-49, doi: 10.1071/EG06044.

- Commer, M., Doetsch, J., Dafflon, B., Wu, Y., Daley, T. M., Hubbard, S. S., 2016. Time-lapse 3-D electrical resistance tomography inversion for crosswell monitoring of dissolved and supercritical CO₂ flow at two field sites: Escatawpa and Cranfield, Mississippi, USA. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 49, 297-311, doi: 10.1016/j.ijggc.2016.03.020.
- Daily, W., Owen, E., 1991. Cross-borehole resistivity tomography. *Geophysics*, 56, 8, 1228-1235, doi: 10.1190/1.1443142.
- Daily, W., Ramirez, A., LaBrecque, D., Nitao, J., 1992. Electrical resistivity tomography of vadose water movement. *Water Resources Research*, 28, 5, 1429-1442, doi: 10.1029/91WR03087.
- Daily, W., Ramirez, A., Binley, A., LaBrecque, D., 2004. Electrical resistance tomography. *The Leading Edge*, 23, 5, 438-442.
- Daley, T. M., Myer, L. R., Peterson, J. E., Majer, E. L., Hoversten, G. M., 2008. Time-lapse crosswell seismic and VSP monitoring of injected CO₂ in a brine aquifer. *Environmental Geology*, 54, 8, 1657-1665, doi: 10.1007/s00254-007-0943-z.
- Dey, A., Morrison, H. F., 1979. Resistivity Modelling for Arbitrarily Shaped Two-Dimensional Structures. *Geophysical Prospecting* 27, 106-136, doi: 10.1111/j.1365-2478.1979.tb00961.x.
- Dodds, K., Krahenbuhl, R., Reitz, A., Li, Y., Hovorka, S., 2013. Evaluating time-lapse borehole gravity for CO₂ plume detection at SECARB Cranfield, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, doi: 10.1016/j.ijggc.2013.05.024.
- Doetsch, J. A., Coscia, I., Greenhalgh, S., Linde, N., Green A., Günther, T., 2010. The borehole-fluid effect in electrical resistivity imaging. *Geophysics*, 75, 4, F107-F114, doi: 10.1190/1.3467824.
- Doetsch, J., Kowalsky, M. B., Doughty, C., Finsterle, S., Ajo-Franklin, J. A., Carrigan, C. R., Yang, X., Hovorka, S. D., Daley, T. M., 2013. Constraining CO₂ migration by coupled modeling and inversion of ERT and gas composition data. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, doi: 10.1016/j.ijggc.2013.04.011.
- Doughty, C., Freifeld, B. M., Trautz, R. C., 2008. Site characterization for CO₂ geologic storage and vice versa: the Frio brine pilot, Texas, USA as a case study, *Environmental Geology*, 54, 8, 1635-1656, doi: 10.1007/s00254-007-0942-0.
- Ebigbo, A., Bielinski, A., Kopp, A., Class, H., Helmig, R., 2006. Numerical Modeling of CO₂ Sequestration with MUFTE-UG. *Computational Methods in Water Resources XVI International Conference (CMWR)*, Copenhagen, Denmark.
- EEPR, 2011. Bericht der Kommission an den Rat und das Europäische Parlament über die Durchführung des Europäischen Energieprogramms zur Konjunkturbelebung, Brüssel, 20.04.2011, KOM(2011) 217 endgültig.
- Eiken, O., Ringrose, P., Hermanrud, C., Nazarian, B., Torp, T. A., Høier, L., 2011. Lessons learned from 14 years of CCS operations: Sleipner, In Salah and Snøhvit. *Energy Procedia*, 4, 5541-5548, doi: 10.1016/j.egypro.2011.02.541.
- Engelmann, M., Lippmann, P., Zemke, J., Zenner, M., 2008. Eignungsnachweis für die Injektion geringer Mengen CO₂ am Standort Ketzin - CO₂SINK. (UGS - Untergrundspeicher- und Geotechnologie-Systeme GmbH). *CO₂SINK- interner Bericht*.
- Estublier, A., Lackner, A. S., 2009. Long-term simulation of the Snøhvit CO₂ storage. *Energy Procedia*, 1, 1, 3221-3228, doi: 10.1016/j.egypro.2009.02.106.

- Europäisches Exzellenznetzwerk CO2GeoNet, 2009. Geologische CO₂-Speicherung - was ist das eigentlich? Verantwortliche Nutzung fossiler Brennstoffe; Beseitigung der Hauptquelle von Treibhausgasen; Rückführung des Kohlendioxids in den Untergrund; Brückentechnologie, bis klimafreundliche Energiequellen in ausreichender Menge zur Verfügung stehen. *Broschüre*, <http://d-nb.info/1001318323>.
- Fischer, C., 2013. Grundlagen und Grundstrukturen eines Klimawandelanpassungsrechts (Recht der Nachhaltigen Entwicklung). *Mohr Siebeck Verlag*, ISBN: 978-3161529177.
- Flehsig, C., Fabig, T., Rücker, C., Schütze, C., 2010. Geoelectrical investigations in the Cheb Basin/ W-Bohemia: An approach to evaluate the near-surface conductivity structure. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 54, 3, 443-463, doi: 10.1007/s11200-010-0026-6.
- Flett, M., Brantjes, J., Gurton, R., McKenna, J., Tankersley, T., Trupp, M., 2009. Subsurface development of CO₂ disposal for the Gorgon Project. *Energy Procedia*, 1, 3031-3038, doi: 10.1016/j.egypro.2009.02.081.
- Fleury, M., Deschamps, H., 2008. Electrical conductivity and viscosity of aqueous NaCl solutions with dissolved CO₂. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 53, 2505-2509, doi: 10.1021/je8002628.
- Förster, A., Norden, B., Zinck-Jørgensen, K., Frykman, P., Kulenkampff, J., Spangenberg, E., Erzinger, J., Zimmer, M., Kopp, J., Borm, G., Juhlin, C., Cosma, C., Hurter, S., 2006. Baseline characterization of the CO₂SINK geological storage site at Ketzin, Germany. *Environmental Geosciences*, 13, 3, 145-161, 10.1306/eg.02080605016.
- Förster, A., Giese, R., Juhlin, C., Norden, B., Springer, N., and CO₂SINK Group, 2009. The Geology of the CO₂SINK Site: From Regional Scale to Laboratory Scale. *Energy Procedia*, 1, 1, 2911-2918, doi: 10.1016/j.egypro.2009.02.066.
- Förster, A., Schöner, R., Förster, H.-J., Norden, B., Blaschke, A.-W., Luckert, J., Beutler, G., Gaupp, R., Rhede, D., 2010. Reservoir characterization of a CO₂ storage aquifer: The Upper Triassic Stuttgart Formation in the Northeast German Basin. *Marine and Petroleum Geology*, 27, 2156-2172, doi: 10.1016/j.marpetgeo.2010.07.010.
- Fricke, S. und Schön, J., 1999. *Praktische Bohrlochgeophysik*. Enke im Georg Thieme Verlag, Stuttgart.
- Friedel, S., 2000. Über die Abbildungseigenschaften der geoelektrischen Impedanztomographie unter Berücksichtigung von endlicher Anzahl und endlicher Genauigkeit der Meßdaten. *Dissertation*, Universität Leipzig, *Shaker Verlag Aachen*, ISBN 3-8265-7587-3.
- Friedmann, S. J., 2007. Geological Carbon Dioxide Sequestration. *Elements*, 3, 3, 179-184, doi: 10.2113/gselements.3.3.179.
- Geselowitz, D. B., 1971. An Application of Electrocardiographic Lead Theory to Impedance Plethysmography. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, BME-18, 1, 38-41.
- Giese, R., Henniges, J., Lüth, S., Morozova D., Schmidt-Hattenberger, C., Würdemann, H., Zimmer, M., Cosma, C., Juhlin, C., CO₂SINK Group, 2009. Monitoring at the CO₂SINK Site: A Concept Integrating Geophysics. *Geochemistry and Microbiology. Energy Procedia* 1, 2251-2259, doi: 10.1016/j.egypro.2009.01.293.
- Ginzky, H., Hahlbeck, E., 2008. CO₂-Abscheidung und Speicherung im Meeresboden: Meeresökologische und geologische Anforderungen für deren langfristige Sicherheit sowie Ausgestaltung des rechtlichen Rahmens. Umweltbundesamt, Nr. 24/2008, *Forschungsbericht* 20625200, ISSN 1862-4804.

- Girard, J.-F., Coppo, N., Rohmer, J., Bourgeois, B., Naudet, V., Schmidt-Hattenberger, C., 2011. Time-lapse CSEM monitoring of the Ketzin (Germany) CO₂ injection using 2xMAM configuration. *Energy Procedia*, 4, 3322-3329, doi: 10.1016/j.egypro.2011.02.253.
- Goes, B. J. M., Meekes, J. A. C., 2002. Evaluating various electrode configurations for the detection of DNAPL'S with ERT. *8th general annual meeting of the European Section of the Environmental and Engineering Society (EEGS-ES)*, 461-464, doi: 10.3997/2214-4609.201406272.
- Götz, J., Giese, R., Lüth, S., Schmidt-Hattenberger, C., Juhlin, C., Cosma, C., 2011. Borehole seismic monitoring of CO₂ storage within a saline aquifer at Ketzin, Germany. *EAGE Borehole Geophysics Workshop - Emphasis on 3D VSP*, Istanbul, Turkey.
- Götz, J., 2013. Borehole seismic monitoring of CO₂ storage within a saline aquifer at Ketzin, Germany. *Dissertation*, Technische Universität Berlin, URN: urn:nbn:de:kobv:83-opus4-46308.
- Grayver, A., Streich, R., Ritter, O., 2014. 3D inversion and resolution analysis of land-based CSEM data from the Ketzin CO₂ storage formation. *Geophysics*, 79, 2, E101-E114, doi: 10.1190/GEO2013-0184.1.
- Günther, T., Rücker, C., Spitzer, K., 2006. Three-dimensional modeling and inversion of DC resistivity data incorporating topography - Part II. Inversion. *Geophysical Journal International*, 166, 2, 506-517, doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.03011.x.
- Hagrey, S. A. al, 2011. 2D Model Study of CO₂ Plumes in Saline Reservoirs by Borehole Resistivity Tomography. *International Journal of Geophysics*, doi: 10.1155/2011/805059.
- Hagrey, S. A. al, Strahser, M., Rabbel, W., 2013. Seismic and geoelectric modeling studies of parameters controlling CO₂ geostorage in saline formations. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, doi: 10.1016/j.ijggc.2013.01.041.
- Hatzsch, P., 1994. Bohrlochmessungen. *Ferdinand Enke Verlag*, Stuttgart.
- Henderson, R. P., Webster, J. G., 1978. An Impedance Camera for Spatially Specific Measurements of the Thorax. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. BME-25, 3.
- Henninges, J., Brandt, W., 2007. Evaluation of cement integrity using distributed temperature sensing. *Proceedings Engine Workshop 4 "Drilling cost effectiveness and feasibility of high temperature drilling"*, ISOR, Reykjavik, Iceland, 41p.
- Henninges, J., Prevedel, B., Loizzo, M., 2008. Echtzeit-Beobachtung von Bohrlochzementationen und Sondenbehandlungen mit ortsverteilte Temperaturmessungen, in Tagungsbericht 2008-1, *Beiträge der DGMK/ÖGEW-Frühjahrstagung des Fachbereiches "Aufsuchung und Gewinnung" am 10. und 11. April 2008 in Celle*, edited, p. 47, Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V., Hamburg, ISBN 978-3-936418-79-8.
- Henninges, J., Liebscher, A., Bannach, A., Brandt, W., Hurter, S., Köhler, S., Möller, F., CO₂SINK Group, 2011. P-T-p and two-phase fluid conditions with inverted density profile in observation wells at the CO₂ storage site at Ketzin (Germany). *Energy Procedia*, 4, 6085-6090, doi: 10.1016/j.egypro.2011.02.614.

- Hermanrud, C., Andresen, T., Eiken, O., Hansen, H., Janbu, A., Lippard, J., Bolås, H. N., Simmenes, T. H., Teige, G. M. G., Østmo, S., 2009. Storage of CO₂ in saline aquifers- Lessons learned from 10 years of injection into the Utsira Formation in the Sleipner area. *Energy Procedia*, 1, 1, 1997-2004, doi: 10.1016/j.egypro.2009.01.260.
- Holloway, S., Chadwick, A., and all participants of the CO₂CARE Consortium, 2013. Best Practice Guidelines. British Geological Survey, www.co2care.org.
- Hortle, A., de Caritat, P., Stalvies, C., Jenkins, C., 2011. Groundwater monitoring at the Otway project site, Australia. *Energy Procedia*, 4, 5495-5503, doi: 10.1016/j.egypro.2011.02.535.
- Hosa, A., Esentia, M., Stewart, J., Haszeldine, S., 2011. Injection of CO₂ into saline formations: Benchmarking worldwide projects. *Chemical Engineering Research and Design*, 89, 9, 1855-1864, doi: 10.1016/j.cherd.2011.04.003.
- Hosseini, S. A., Lashgari, H., Choi, J. W., Nicot, J.-P., Lu, J., Susan D. Hovorka, S. D., 2012. Static and dynamic reservoir modeling for geological CO₂ sequestration at Cranfield, Mississippi, U.S.A. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, doi: 10.1016/j.ijggc.2012.11.009.
- Hoth, N. T., Würdemann, H., 2009. Biogeochemische Wechselwirkungen - langfristige mikrobielle Umwandlung des gespeicherten CO₂. In: Stroink, L., Gerling, J. P., Kühn, M., Schilling, F. R. (Hrsg.), Die dauerhafte geologische Speicherung von CO₂ in Deutschland - Aktuelle Forschungsergebnisse und Perspektiven, Geotechnologien, *Science Report*, Nr. 14, 60-67, ISSN 1619-7399.
- Hovorka, S. D., Benson, S. M., Doughty, C., Freifeld, B. M., Sakurai, S., Daley, T. M., Kharaka, Y. K., Holtz, M. H., Trautz, R. C., Nance, H. S., Myer, L. R., Knauss, K. G., 2006. Measuring permanence of CO₂ storage in saline formations: the Frio experiment, *Environmental Geosciences*, 13, 2, 105-121, doi: 10.1306/eg.11210505011.
- Hovorka, S. D., Meckel, T. A., Trevino, R. H., Lu, J., Nicot, J.-P., Choi, J.-W., Freeman, D., Cook, P., Daley, T. M., Ajo-Franklin, J. B., Freifeild, B. M., Doughty, C., Carrigan, C. R., La Brecque, D., Kharaka, Y. K., Thordsen, J. J., Phelps, T. J., Yang, C., Romanak, K. D., Zhang, T., Holt, R. M., Lindler, J. S., Robert J. Butsch, R. J., 2011. Monitoring a large volume CO₂ injection: Year two results from SECARB project at Denbury's Cranfield, Mississippi, USA. *Energy Procedia* 4, 3478-3485, doi: 10.1016/j.egypro.2011.02.274.
- Hovorka S. D., Meckel, T. A., Trevino, R. H., 2013. Monitoring a large-volume injection at Cranfield, Mississippi - Project design and recommendations. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, doi: 10.1016/j.ijggc.2013.03.021.
- Howard, B. C., 2014. Northern Hemisphere Cracks 400 ppm CO₂ for Whole Month for First Time. *National Geographic*.
- IPCC, 2005. Carbon Dioxide Capture and Storage. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Metz, B., Davidson, O., de Coninck, H., Loos, M., Meyer, L. (Hrsg.), *Cambridge University Press*, UK, ISBN: 9780521685511.
- Ivandic, M., Yang, C., Lüth, S., Cosma, C., Juhlin, C., 2012. Time-lapse analysis of sparse 3D seismic data from the CO₂ storage pilot site at Ketzin, Germany. *Journal of Applied Geophysics*, 84, 14-28, doi: 10.1016/j.jappgeo.2012.05.010.
- Ivandic, M., Juhlin, C., Lüth, S., Bergmann, P., Kashubin, A., Sopher, D., Ivanova, A., Baumann, G., Henninges, J., 2015. Geophysical monitoring at the Ketzin pilot site for CO₂ storage: New insights into the plume evolution. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 32, 90-105 doi: 10.1016/j.ijggc.2014.10.015.

- Ivanova, A., Kashubin, A., Juhonjuntti, N., Kummerow, J., Henninges, J., Juhlin, C., Lüth, S., Ivandic, M., 2012. Monitoring and volumetric estimation of injected CO₂ using 4D seismic, petrophysical data, core measurements and well logging: a case study at Ketzin, Germany. *Geophysical Prospecting*, 60, 957–973, doi: 10.1111/j.1365-2478.2012.01045.x.
- Ivanova, A., 2013. Geological Structure and Time-Laps Studies of CO₂ Injection at the Ketzin Pilot Site, Germany. Doctoral thesis, *Uppsala University*, URN: urn:nbn:se:uu:diva-196127.
- IWR, 2014. Internationales Wirtschaftsforum Regenerative Energien (IWR). *Website* www.iwr.de (Ausgabe 15.08.2014).
- Juhlin, C., Giese, R., Zinck-Jørgensen, K., Cosma, C., Kazemeini, H., Juhonjuntti, N., Lüth, S., Norden, B., Förster, A., 2007. 3D baseline seismics at Ketzin, Germany: The CO₂SINK project. *Geophysics*, 72, 121–132, doi: 10.1190/1.2754667.
- Just, A., 2001. Bestimmung der räumlichen Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes an zylinderförmigen Körpern mit Hilfe der Elektrischen Widerstandstomographie - Anwendung in der Petrophysik auf Bohrkerne und Lockersedimente. *Dissertation*, Universität Leipzig, *Shaker Verlag Aachen* (2002), ISBN 3-8265-9894-6.
- Kazemeini, S.H., Juhlin, C., Zinck-Jørgensen, K., Norden, B., 2009. Application of the continuous wavelet transform on seismic data for mapping of channel deposits and gas detection at the CO₂SINK site Ketzin, Germany. *Geophysical Prospecting*, 57, 1, 111–123, doi: 10.1111/j.1365-2478.2008.00723.x.
- Kemna, A., Vanderborght, J., Kulesa, B., Vereecken, H., 2002. Imaging and characterisation of subsurface solute transport using electrical resistivity tomography (ERT) and equivalent transport models. *Journal of Hydrology*, 267, 3-4, 125-146, doi: 10.1016/S0022-1694(02)00145-2.
- Kempka, T., Kühn, M., Class, H., Frykman, P., Kopp, A., Nielsen, C.M., Probst, P., 2010. Modelling of CO₂ arrival time at Ketzin - Part I. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 4, 6, 1007-1015, doi: 10.1016/j.ijggc.2010.07.005.
- Kempka, T., Kühn, M., 2013. Numerical simulations of CO₂ arrival times and reservoir pressure coincide with observations from the Ketzin pilot site, Germany. *Environmental Earth Sciences*, 70, 8, 3675-3685, doi: 10.1007/s12665-013-2614-6.
- Kießling, D., Schöbel, B., Krüger, K., Schütt, H., Schmidt-Hattenberger, C., Danckwardt, E., Rücker, C., Petzold, G., 2008. Geoelektrische Überwachung der unterirdischen CO₂-Speicherung in Ketzin. 13. *Seminar „Hochauflösende Geoelektrik“*, Leipzig.
- Kießling, D., Schmidt-Hattenberger, C., Schütt, H., Schöbel, B., Schilling, F., Krüger, K., Danckwardt, E., and CO₂Sink Group, 2009. CO₂SINK project - main focus on geoelectric monitoring of geological CO₂ storage at Ketzin (Germany). *SEG 2009, Summer Research Workshop, CO₂ Sequestration Geophysics*, Banff, Canada.
- Kießling, D., Danckwardt, E., Rücker, C., Krüger, K., Petzold, G., Voigt, R., Schmidt-Hattenberger, C., und CO₂SINK Group, 2010a. Geoelektrische Oberflächen-Bohrlochmessungen am Standort Ketzin: Monitoring der CO₂-Verteilung im Reservoir. Abstract Tagungsbeitrag, *Deutsche Geophysikalische Gesellschaft DGG 2010*, Bochum, Deutschland.

- Kiessling, D., Schmidt-Hattenberger, C., Schütt, H., Schilling, F., Krüger, K., Schöbel, B., Danckwardt, E., Kummerow, J., and CO₂Sink Group, 2010b. Geoelectrical methods for monitoring geoelectrical CO₂ storage: First results from cross-hole and surface-downhole measurements from the CO₂SINK test site at Ketzin (Germany). *International Journal of Greenhouse Gas Control* 4, 5, 816-826, doi: 10.1016/j.ijggc.2010.05.001.
- Knödel, K., Krummel, H., Lange, G., 2005. Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten: Band 3: Geophysik. *Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York*, ISBN: 3-540-22275-8.
- Knopf, S., May, F., Müller, C., Gerling, J., 2010. Neuberechnung möglicher Kapazitäten zur CO₂-Speicherung in tiefen Aquifer-Strukturen. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 60, 4, 76-80.
- Kohlendioxid-Speicherungsgesetz - KSpG: Gesetz zur Demonstration der dauerhaften Speicherung von Kohlendioxid, 2012. *BGBI. I*, S. 1726, <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/kspg/gesamt.pdf>.
- Kopp, A., Probst, P., Class, H., Helmig, R., 2009. Estimation of CO₂ Storage Capacity Coefficients in Geologic Formations. *Energy Procedia*, 1, 1, 2863-2870, doi: 10.1016/j.egypro.2009.02.060.
- Krüger, K., 2013. *Persönliche Mitteilung*. Kabelwiderstände der Bohrlochmesskabel der Bohrungen Ktzi200, Ktzi201 und Ktzi202.
- Kück, J., 2012. *Persönliche Mitteilung*. Bohrlochabweichungsmessungen in den Bohrungen Ktzi200, Ktzi201 und Ktzi202.
- Kühn, M., 2011. Chancen und Risiken der CO₂-Speicherung. - In: Renn, J., Schlögl, R., Zenner, H.-P. (Eds.), *Herausforderung Energie*, 93-108, EDOC: 17600, http://www.edition-open-access.de/proceedings/1/chapter_7.html.
- Kummerow, J., Spangenberg, E., 2011. Experimental evaluation of the impact of the interactions of CO₂-SO₂, brine, and reservoir rock on petrophysical properties: A case study from the Ketzin test site, Germany. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 12, Q05010, doi: 10.1029/2010GC003469.
- Laaß, D., Danckwardt, E., Petzold, G., Voigt, R., 2006. Geoelectric survey of hydraulic experiments at the German Deep Drilling site KTB at km-scale. *Proceedings EAGE Near Surface*, Helsinki, Finland.
- Labitzke, T., Bergmann, P., Kießling, D., Schmidt-Hattenberger, C., 2012. 3D surface-downhole electrical resistivity tomography data sets of the Ketzin CO₂ storage pilot from the CO₂SINK project phase. *Scientific Technical Report: Data*, 12/05, Potsdam, doi: 10.2312/GFZ.b103-12051.
- LaBrecque, D., Daily, W., 2008. Assessment of measurement errors for galvanic-resistivity electrodes of different composition. *Geophysics*, 73, 2, F55-F64, doi: 10.1190/1.2823457.
- Lagneau, V., Pipart, A., Catalette, H., 2005. Reactive Transport Modelling of CO₂ Sequestration in Deep Saline Aquifers. *Oil & Gas Science and Technology - Revue d'IFP Energies nouvelles*, 60, 2, 231-247, doi: 10.2516/ogst:2005014.
- Langmanson, M., 2004: Methods and apparatus for measuring electrical properties of a ground using a graphite electrode. *U.S. Pat. No. 6,674,286 B2*.
- Lengler, U., De Lucia, M., Kühn, M., 2010. The impact of heterogeneity on the distribution of CO₂: Numerical simulation of CO₂ storage at Ketzin. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 4, 6, 1016-1025, doi: 10.1016/j.ijggc.2010.07.004.

- Lengler, U., 2012. Einfluss von heterogenen Permeabilitätsfeldern auf die CO₂-Speicherung in salinen Aquiferen am Beispiel vom Pilotstandort Ketzin. *Dissertation*, Technische Universität Hamburg-Harburg, URN: urn:nbn:de:gbv:830-tubdok-11536.
- Li, Y., Oldenburg, W., 1994. Inversion of 3-D DC resistivity data using an approximate inverse mapping. *Geophysical Journal International*, 116, 3, 527–537, doi: 10.1111/j.1365-246X.1994.tb03277.x.
- Liebscher, A., Martens, S., Möller, F., Lüth, S., Schmidt-Hattenberger, C., Kempka, T., Szzybalski, A., Kühn, M., 2012. Überwachung und Modellierung der geologischen CO₂-Speicherung - Erfahrungen vom Pilotstandort Ketzin, Brandenburg (Deutschland). *Geotechnik*, 35, 3, 177-186; doi: 10.1002/gete.201200005.
- Liebscher, A., Möller, F., Bannach, A., Köhler, C., Wiebach, J., Schmidt-Hattenberger, C., Weiner, M., Pretschner, C., Ebert, K., Zemke, J., 2013. Injection operation and operational pressure-temperature monitoring at the CO₂ storage pilot site Ketzin, Germany - Design, results, recommendations. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 15, 163-173, doi: 10.1016/l.ijggc.2013.02.019.
- Lu, J., Kharaka, Y., Thordsen, J., Horita, J., Karamalidis, A., Griffith, C., Hakala, A., Ambats, G., Cole, D., Phelps Manning, M., Cook, T., Hovorka, P. S., 2012a. CO₂-rock-brine interactions in Lower Tuscaloosa Formation at Cranfield CO₂ sequestration site, Mississippi, USA. *Chemical Geology* 291, 269-277, doi: 10.1016/j.chemgeo.2011.10.020.
- Lu, J., Kordi, M., Hovorka, S. D., Meckel, T. A., C.A. Christopher, C. A., 2012b. Reservoir characterization and complications for trapping mechanisms at Cranfield CO₂ injection site. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, doi: 10.1016/j.ijggc.2012.10.007.
- Lüth, S., Bergmann, P., Cosma, C., Enescu, N., Giese, R., Götz, J., Ivanova, A., Juhlin, C., Kashubin, A., Yang, C., Zhang, F., 2011. Time-lapse seismic surface and down-hole measurements for monitoring CO₂ storage in the CO₂SINK project (Ketzin, Germany). *Energy Procedia*, 4, 3435-3442, doi: 10.1016/j.egypro.2011.02.268.
- Lüth, S., Ivanova, A., Kempka, T., 2015. Conformity assessment of monitoring and simulation of CO₂ storage: A case study from the Ketzin pilot site. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 42, 329-339, doi: 10.1016/j.ijggc.2015.08.005.
- Lytle, R. J., K. A. Dines, 1978. An impedance camera: A system for determining the spatial variation of electrical conductivity, *Lawrence Livermore National Laboratory Report UCRL-52413*, Livermore, California, USA.
- Marescot, L., Lopes, S. P., Lagabriele, R., Chapellier, D., 2002. Designing surface-to-borehole electrical resistivity tomography surveys using the Frechet derivative. *Proceedings of the 8th Meeting of the Environmental and Engineering Geophysical Society - European Section*, 289-292.
- Martens, S., Liebscher, A., Möller, F., Würdemann, H., Schilling, F., Kühn, M., and Ketzin Group, 2011. Progress report on the first European on-shore CO₂ storage site at Ketzin (Germany) - Second year of injection. *Energy Procedia*, 4, 3246-3253, doi: 10.1016/j.egypro.2011.02.243.
- Martens, S., Kempka, T., Liebscher, A., Lüth, S., Möller, F., Myrntinen, A., Norden, B., Schmidt-Hattenberger, C., Zimmer, M., Kühn, M., and the Ketzin Group, 2012. Europe's longest-operating on-shore CO₂ storage site at Ketzin, Germany: A progress report after three years of injection. *Environmental Earth Sciences*, doi: 10.1007/s12665-012-1672-5.

- Martens, S., Liebscher, A., Möller, F., Henniges, J., Kempka, T., Lüth, S., Norden, B., Prevedel, B., Szizybalski, A., Zimmer, M., Kühn, M. and the Ketzin Group, 2013. CO₂ storage at the Ketzin pilot site, Germany: Fourth year of injection, monitoring, modelling and verification. *Energy Procedia*, 37, 6434-6443, doi: 10.1016/j.egypro.2013.06.573.
- Martens, S., Möller, F., Streibel, M., Liebscher, A. and the Ketzin Group, 2014. Completion of five years of safe CO₂ injection and transition to the post-closure phase at the Ketzin pilot site. *Energy Procedia*, 59, 190-197, doi: 10.1016/j.egypro.2014.10.366.
- Martens, S., Conze, R., De Lucia, M., Henniges, J., Kempka, T., Liebscher, A., Lüth, L., Möller, F., Norden, B., Prevedel, B., Schmidt-Hattenberger, C., Szizybalski, A., Vieth-Hillebrand, A., Würdemann, H., Zemke, K., Zimmer, M., 2015a. Joint Research Project CO2MAN (CO2MAN Reservoir Management): Continuation of Research and Development Work for CO₂ Storage at the Ketzin Pilot Site. In: Liebscher, A., Münch, U., Geological Storage of CO₂ - Long Term Security Aspects, Advanced Technologies in Earth Sciences, *Springer International Publishing Switzerland*, 1-32, doi: 10.1007/978-3-319-13930-2_1.
- Martens, S., Kempka, T., Liebscher, A., Möller, F., Schmidt-Hattenberger, C., Streibel, M., Szizybalski, A., Zimmer, M., 2015b. Field experiment on CO₂ back-production at the Ketzin pilot site. European Geosciences Union General Assembly 2015 - Division Energy, Resources & Environment, *Energy Procedia*, 76, 519-527, doi: 10.1016/j.egypro.2015.07.902.
- Martin, C., Eiblmaier, M., 2003. Lexikon der Geowissenschaften. *Spektrum Akademischer Verlag*, Heidelberg, ISBN-10: 3827404207.
- Mathieson, A., Wright, I., Roberts, D., Ringrose, P., 2009. Satellite Imaging to Monitor CO₂ Movement at Krechba, Algeria. *Energy Procedia*, 1, 2201-2209, doi: 10.1016/j.egypro.2009.01.286.
- Mathieson, A., Midgley, J., Dodds, K., Wright, I., Ringrose, P., Saoul, N., 2010. CO₂ sequestration monitoring and verification technologies applied at Krechba, Algeria, *The Leading Edge*, 29, 2, 216-222, doi: 10.1190/1.3304827.
- Maxwell, J. C., 1865. A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 155, 459-512.
- MCC, 2016. Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC) Pressemitteilung vom 11.11.2016, Berlin/ Marrakesch, http://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/16/files/Germany_MCC_GCPBudget2016_German.pdf
- Michael, K., Golab, A., Shulakova, V., Ennis-King, J., Allinson, G., Sharma S., Aiken, T., 2010. Geological storage of CO₂ in saline aquifers - A review of the experience from existing storage operations. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 4, 4, 659-667, doi: 10.1016/j.ijggc.2009.12.011.
- Militzer, H., Weber, F., 1985. Angewandte Geophysik, Band 2. *Springer Verlag*, Wien & *Akademie Verlag*, Berlin.
- Mito, S., Xue, Z., Ohsumi, T., 2008. Case study of geochemical reactions at the Nagaoka CO₂ injection site, Japan. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2, 3, 309-318, doi: 10.1016/j.ijggc.2008.04.007.
- Mito, S., Xue, Z., 2011. Post-Injection monitoring of stored CO₂ at the Nagaoka pilot site: 5 years time-lapse well logging results. *Energy Procedia* 4, 3284-3289, doi: 10.1016/j.egypro.2011.02.248.

- Möller, F., Liebscher, A., Martens, S., Schmidt-Hattenberger, C., Kühn, M., 2012. Yearly Operational Datasets of the CO₂ Storage Pilot Site Ketzin, Germany. *Scientific Technical Report: Data*, 12/06, Potsdam, doi: 10.2312/GFZ.b103-12066.
- Morozova, D., Wandrey, M., Alawi, M., Zimmer, M., Vieth, A., Zettlitzer, M., Wuerdemann, H., 2010. Monitoring of the microbial community composition in saline aquifers during CO₂ storage by fluorescence in situ hybridisation. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 4, 6, 981-989, doi: 10.1016/j.ijggc.2009.11.014.
- Morozova, D., Zettlitzer, M., Let, D., Würdemann, H., and the CO₂SINK group, 2011. Monitoring of the microbial community composition in deep subsurface saline aquifers during CO₂ storage in Ketzin, Germany. *Energy Procedia*, 4, 4362-4370, doi: 10.1016/j.egypro.2011.02.388.
- Mufti, I. R., 1976. Finite-difference resistivity modeling for arbitrarily shaped two-dimensional structures. *Geophysics*, 41, 62–78, doi: 10.1190/1.1440608.
- Myer, L. R., 2001. Laboratory Measurement of Geophysical Properties for Monitoring of CO₂ Sequestration. *Proceedings First National Conference on Carbon Sequestration*, the National Energy Technology Laboratory (NETL), Washington, DC, USA.
- Nakajima, T., Xue, Z., 2013. Evaluation of a resistivity model derived from time-lapse well logging of a pilot-scale CO₂ injection site, Nagaoka, Japan. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 12, 288-299, doi: 10.1016/j.ijggc.2012.11.002
- Nakatsuka, Y., Xue, Z., Garcia, H., Matsuoka, T., 2010. Experimental study on CO₂ monitoring and quantification of stored CO₂ in saline formations using resistivity measurements. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 4, 209-216, doi: 10.1016/j.ijggc.2010.01.001.
- Nimmer, R. E., Osiensky, J. L., Binley, A. M., Sprenke, K. F., Williams, B. C., 2007. Electrical resistivity imaging of conductive plume dilution in fractured rock. *Hydrogeology Journal*, 15, 5, 877-890, doi: 10.1007/s10040-007-0159-z.
- Nimtz, M., Klatt, M., Wiese, B., Kühn, M., Krautz, H. J., 2010. Modelling of the CO₂ process- and transport chain in CCS systems - Examination of transport and storage processes. *Chemie der Erde*, 70, 3, 185-192, doi: 10.1016/j.chemer.2010.05.011.
- Norden, B., 2007a. Geologischer Abschlussbericht der Bohrung CO₂ Ktzi 200/2007. *CO₂SINK- interner Bericht*.
- Norden, B., 2007b. Geologischer Abschlussbericht der Bohrung CO₂ Ktzi 201/2007. *CO₂SINK- interner Bericht*.
- Norden, B., 2007c. Geologischer Abschlussbericht der Bohrung CO₂ Ktzi 202/2007. *CO₂SINK- interner Bericht*.
- Norden, B., Förster, A., Vu-Hoang, D., Marcelis, F., Springer, N., Le Nir, I., 2010. Lithological and petrophysical core-log interpretation in CO₂SINK, the European onshore research storage and verification project. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, doi: 179-192, 10.2118/115247-PA.
- Norden, B., 2011. Modelling of the near-surface groundwater flow system at the CO₂SINK site Ketzin, Germany. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 162, 1, 63-77, doi: 10.1127/1860-1804/2011/0162-0063.
- Norden, B., Frykman, P., 2013. Geological modelling of the Triassic Stuttgart Formation at the Ketzin CO₂ storage site, Germany. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 19, 756-774, doi: 10.1016/j.ijggc.2013.04.019.

- Onishi, K., Ishikawa, Y., Yamada, Y., Matsuoka, T., 2006. Measuring electric resistivity of rock specimens injected with gas, liquid and supercritical CO₂. *77th Annual Meeting of the Society of Exploration Geophysicists (SEG)*, New Orleans, 1480-1484.
- Picotti, S., Gei, D., Carcione, J. M., Grünhut, V., Osella, A., 2013. Sensitivity analysis from single-well ERT simulations to image CO₂ migrations along wellbores. *The Leading Edge*, 32, 5, 504–512, doi: 10.1190/tle32050504.1.
- Press, F., Siever, R., 1995. Allgemeine Geologie. *Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg Berlin Oxford*, ISBN: 3-86025-390-5.
- Prevedel, B., Wohlgemuth, L., Henniges, J., Krüger, K., Norden, B., Förster, A., and the CO₂SINK Drilling Group, 2008. The CO₂SINK boreholes for geological storage testing. *Scientific Drilling*, 6, 32-37, doi: 10.2204/iodp.sd.6.04.2008.
- Prevedel, B., Martens, S., Norden, B., Henniges, J., Freifeld, B. M., 2014. Drilling and abandonment preparation of CO₂ storage wells - Experience from the Ketzin pilot site. *Energy Procedia*, 63, 6067-6078, doi: 10.1016/j.egypro.2014.11.639.
- Pribnow, D. F. C., Schütze, C., Hurter, S., Flechsig, C., Sass, J. H., 2003. Fluid flow in the resurgent dome of Long Valley Caldera: implications from thermal data and deep electrical sounding. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 127, 329-345, doi: 10.1016/S0377-0273(03)00175-6.
- Prinz, H., 1997. Abriß der Ingenieurgeologie. *Ferdinand Enke Verlag*, Stuttgart.
- Prinz, H. und Strauß, R., 2011. *Ingenieurgeologie*. Spektrum Akademischer Verlag, 5. Auflage.
- Radic, T., 2008. Instrumentelle und auswertemethodische Arbeiten zur Wechselstrom-geoelektrik. *Dissertation*, Technischen Universität Berlin.
- Ramirez, A., Daily, W., Binley, A., LaBrecque, D., Roelant, D., 1996. Detection of Leaks in Underground Storage Tanks Using Electrical Resistance Methods. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 1, 3, 189–203.
- Ramirez, A., Newmark, R., Daily, W., 2003. Monitoring Carbon Dioxide Floods Using Electrical Resistance Tomography (ERT): Sensitivity Studies. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 8, 3, 187-208, doi: 10.4133/JEEG8.3.187.
- Revil, A., Finizola, A., Sortino F., Ripepe, M., 2004. Geophysical investigations at Stromboli volcano, Italy: implications for ground water flow and paroxysmal activity. *Geophysical Journal International*, 157, 1, 426-440, doi: 10.1111/j.1365-246X.2004.02181.x.
- Ringrose, P. S., Roberts, D. M., Gibson-Poole, C. M., Bond, C., Wightman, R., Taylor, M., Raikes, S., Iding, M., and Østmo, S., 2011. Characterisation of the Krechba CO₂ storage site: Critical elements controlling injection performance. *Energy Procedia*, 4, 4672-4679. doi: 10.1016/j.egypro.2011.02.428.
- Rinke, M., 2007a. Bohrtechnischer Abschlussbericht zur Erstellung der Bohrung Ketzin 200 (Ktzi 200). *CO₂SINK- interner Bericht*.
- Rinke, M., 2007b. Bohrtechnischer Abschlussbericht zur Erstellung der Bohrung Ketzin 201 (Ktzi 201). *CO₂SINK- interner Bericht*.
- Rinke, M., 2007c. Bohrtechnischer Abschlussbericht zur Erstellung der Bohrung Ketzin 202 (Ktzi 202). *CO₂SINK- interner Bericht*.
- Rostron, B., Whittaker, S., 2011. 10+ years of the IEA-GHG Weyburn-Midale CO₂ monitoring and storage project: Successes and lessons learned from multiple hydrogeological investigations. *Energy Procedia*, 4, 3636-3643, doi: 10.1016/j.egypro.2011.02.294.

- Rücker, C., Günther, T., Spitzer, K., 2006. Three-dimensional modelling and inversion of dc resistivity data incorporating topography – I. Modelling. *Inversion. Geophysical Journal International*, 166, 2, 495-505, doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.03010.x.
- Rücker, C., Günther, T., 2011. The simulation of finite ERT electrodes using the complete electrode model. *Geophysics*, 76, 4, F227-F238, doi: 10.1190/1.3581356.
- Saito, H., Nobuoka, D., Azuma, H., Xue, Z., Tanase, D., 2006. Time-lapse crosswell seismic tomography for monitoring injected CO₂ in an onshore aquifer, Nagaoka, Japan. *Exploration Geophysics*, 37, 30–36, doi: 10.1071/EG06030.
- Sato, K., 2006. Monitoring the underground migration of sequestered carbon dioxide using Earth tides. *Energy Conversion and Management*, 47, 2414-2423, doi: 10.1016/j.enconman.2005.11.005.
- Sato, K., Mito, S., Horie, T., Ohkuma, H., Saito, H., Watanabe, J., Yoshimura, T., 2009. A monitoring framework for assessing underground migration and containment of carbon dioxide sequestered in an onshore aquifer. *Energy Procedia*, 1, 2261-2268, doi: 10.1016/j.egypro.2009.01.294.
- Sato, K., Mito, S., Horie, T., Ohkuma, H., Saito, H., Watanabe, J., Yoshimura, T., 2011. Monitoring and simulation studies for assessing macro- and meso-scale migration of CO₂ sequestered in an onshore aquifer: Experiences from the Nagaoka pilot site, Japan. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 5, 1, 125-137, doi: 10.1016/j.ijggc.2010.03.003.
- Schilling, F., Giese, R., Schmidt-Hattenberger, C., Laaß, D., Schöbel, B., Henninges, J., Zimmer, M., 2008. CO₂SINK - Das CO₂-Speicherprojekt in Ketzin: Geophysikalische Exploration und Monitoring. In: *DGG-Kolloquium - Geophysikalisches Monitoring. Sonderband II/2008*, 5-24, ISSN-Nr. 0947-1944.
- Schilling, F., Borm, G., Würdemann, H., Möller, F., Kühn, M., and CO₂SINK Group, 2009. Status Report on the First European on-shore CO₂ Storage Site at Ketzin (Germany). *Energy Procedia*, 1, 1, 2029-2035, doi: 10.1016/j.egypro.2009.01.264.
- Schilling, F.R., 2012. Kurzgutachten - Bohrung, Verrohrung und Zementierung. *Karlsruher Institut für Technologie: Karlsruhe*, 16.04.2012, http://dialog-erdgasundfrac.de/sites/dialog-erdgasundfrac.de/files/2_9_Kurzgutachten-Bohrung-Zementation-Verrohrung-final.pdf.
- Schön, J., 1983. Petrophysik. Physikalische Eigenschaften von Gesteinen und Mineralen, *Enke Verlag*, Stuttgart.
- Schlumberger, C., Schlumberger, M., 1930. Electrical studies of the Earth's crust at great depths. *American Institute of Mining and Metallurgical Engineers*, Technical Publication 315, 10-16.
- Schlumberger, 2000. HRLA High-Resolution Laterolog Array. *Produkt-Broschüre*, SMP-5721.
- Schlumberger GmbH Oilfield Service, 2007. Widerstandsbohrlochmessungen in der Bohrung Ktzi201. *CO₂SINK- interne Daten*.
- Schmidt-Hattenberger, C., Bergmann, P., Kießling, D., Krüger, K., Rücker, C., Schütt, H., and Ketzin Group, 2011. Application of a Vertical Electrical Resistivity Array (VERA) for Monitoring CO₂ Migration at the Ketzin Site: First Performance Evaluation. *Energy Procedia* 1, 3363-3370, doi: 10.1016/j.egypro.2011.02.258.

- Schmidt-Hattenberger, C., Bergmann, P., Labitzke, T., Schröder, S., Krüger, K., Rücker, C., Schütt, H., 2012. A modular geoelectrical monitoring system as part of the surveillance concept in CO₂ storage projects, *Energy Procedia*, 23, 400-407, doi: 10.1016/j.egypro.2012.06.062.
- Schmidt-Hattenberger, C., Bergmann, P., Bösing, D., Labitzke, T., Möller, M., Schröder, S., Wagner, F., Schütt, H., 2013. Electrical resistivity tomography (ERT) for monitoring of CO₂ migration - from tool development to reservoir surveillance at the Ketzin pilot site. *Energy Procedia*, 37, 4268-4275, doi: 10.1016/j.egypro.2013.06.329.
- Schmidt-Hattenberger, C., Bergmann, P., Labitzke, T., Wagner, F., 2014. CO₂ migration monitoring by means of Electrical Resistivity Tomography (ERT) - Review on five years of operation of a permanent ERT system at the Ketzin pilot site. *Energy Procedia*, 6, 4366-4373, doi: 10.1016/j.egypro.2014.11.471.
- Schütt, H., Wigand, M., Spangenberg, E., 2005. Geophysical and geochemical effects of supercritical CO₂ on sandstones. In book: The CO₂ Capture and Storage Project (CCP) for Carbon Dioxide Storage in Deep Geologic Formations for Climate Change Mitigation, 2: Geologic Storage of Carbon Dioxide with Monitoring and Verification, Chapter 7, Elsevier, Benson, S., Thomas, D. C., 767–786, doi:10.1016/B978-008044570-0/50133-1.
- Schütt, H., Krüger, K., Töpfer, M., Borm, G., 2008. Tomographieanordnung zur elektrischen Widerstandstomographie in einem Bohrloch. *EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG* EP 1 914 569 A2.
- Schütze, C., Flechsig, C., 2002. Structural Investigations of an Active Hydrothermal System Beneath the Long Valley Caldera, California, Using DC-Resistivity Imaging Methods. *Zeitschrift für geologische Wissenschaften*, 30, 1-2, 119-129.
- Schütze, C., Rücker, C., Flechsig, C., 2010. Large-scale geoelectrical measurements at the Central Bohemian shear zone nearby the research well Rittsteig (Bavaria, Germany). *Zeitschrift für geologische Wissenschaften*, 38, 1, 69-77.
- Schwarzmeier, R. und Voigt, H., 1978. Bohrlochkonstruktion. *Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie*.
- Sharma, S., Cook, P., Jenkins, C., Steeper, T., Lees, M., Ranasinghe, N., 2011. The CO₂CRC Otway Project: Leveraging experience and exploiting new opportunities at Australia's first CCS project site. *Energy Procedia*, 4, 5447-5454, doi: 10.1016/j.egypro.2011.02.530.
- Slater, L., Binley, A. M., Daily, W., Johnson, R., 2000. Cross-hole electrical imaging of a controlled saline tracer injection. *Journal of Applied Geophysics*, 44, 2–3, 85–102, doi: 10.1016/S0926-9851(00)00002-1.
- Slater, L., Binley, A., Versteeg, R., Cassiani, G., Birken, R., Sandberg, S., 2002. A 3D ERT study of solute transport in a large experimental tank. *Journal of Applied Geophysics*, 49, 4, 211–229, doi: 10.1016/S0926-9851(02)00124-6.
- Stalker, L., Boreham, C., Underschultz, J., Freifeld, B., Perkins, E., Schacht, U., Sharma, S., 2009. Geochemical monitoring at the CO₂CRC Otway Project: Tracer injection and reservoir fluid acquisition. *Energy Procedia*, 1, 1, 2119-2125, doi: 10.1016/j.egypro.2009.01.276.
- Storz, H., Storz, W., Jacobs, F., 2000. Electrical resistivity tomography to investigate geological structures of the earth's upper crust. *Geophysical Prospecting*, 48, 455-471, doi: 10.1046/j.1365-2478.2000.00196.x.

- Streich, R., Becken, M., Ritter, O., 2010. Imaging of CO₂ storage sites, geothermal reservoirs, and gas shales using controlled-source magnetotellurics: Modeling studies. *Chemie der Erde*, 70, 3, 63-75, doi: 10.1016/j.chemer.2010.05.004.
- Streich, R., Becken, M., Matzander, U., Ritter, O., 2011. Strategies for land-based controlled-source electromagnetic surveying in high-noise regions. *The Leading Edge*, 30, 10, 1174-1181, doi: 10.1190/1.3657078.
- Szizybalski, A., Kollersberger, T., Möller, F., Martens, S., Liebscher, A., Kühn, M., 2014. Communication Supporting the Research on CO₂ Storage at the Ketzin Pilot Site, Germany - A Status Report after Ten Years of Public Outreach. *Energy Procedia*, 51, 274-280, doi: 10.1016/j.egypro.2014.07.032.
- Underschultz, J., Boreham, C., Dance, T., Stalker, L., Freifeld, B., Kirste, D., Ennis-King, J., 2011. CO₂ storage in a depleted gas field: An overview of the CO₂CRC Otway Project and initial results. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 5, 4, 922-932, doi: 10.1016/j.ijggc.2011.02.009.
- Urosevic, M., Pevzner, R., Shulakova, V., Kepic, A., Caspari, E., Sharma, S., 2011. Seismic monitoring of CO₂ injection into a depleted gas reservoir-Otway Basin Pilot Project, Australia. *Energy Procedia*, 4, 3550-3557, doi: 10.1016/j.egypro.2011.02.283.
- Vandeweyer, V., van der Meer, B., Hofstee, C., Mulders, F., D'Hoore D., Graven, H., 2011. Monitoring the CO₂ injection site: K12-B. *Energy Procedia*, 4, 5471-5478, doi: 10.1016/j.egypro.2011.02.532.
- Vasco, D. W., Rucci, A., Ferretti, A., Novali, F., Bissell, R. C., Ringrose, P. S., Mathieson, A. S., Wright, I. W., 2010. Satellite-based measurements of surface deformation reveal fluid flow associated with the geological storage of carbon dioxide. *Geophysical Research Letters*, 37, 3, doi: 10.1029/2009GL041544.
- Voigt, R., 2002. Bau und Erprobung eines geoelektrischen Vertikalelektrodensystems zum Einsatz in tiefen Bohrungen. University of Leipzig, Germany. *Diplomarbeit*, Universität Leipzig.
- Wagner, F. M., Günther, T., Schmidt-Hattenberger, C., Maurer, H., 2015a. Constructive optimization of electrode locations for target-focused resistivity monitoring. *Geophysics*, 80, 2, E29-E40, doi: 10.1190/geo2014-0214.1.
- Wagner, F. M., Bergmann, P., Rücker, C., Wiese, B., Labitzke, T., Schmidt-Hattenberger, C., Maurer, H., 2015b. Impact and mitigation of borehole related effects in permanent crosshole resistivity imaging: An example from the Ketzin CO₂ storage site. *Journal of Applied Geophysics*, 123, 102-111, doi: 10.1016/j.jappgeo.2015.10.005.
- Ward, S. H., 1990. Resistivity and induced polarization methods. In: Ward, S. H. (ed.): Geotechnical and environmental geophysics, I: Review and tutorial. *Society of Exploration Geophysicists*, Tulsa, Oklahoma, 147-189.
- Wenner, F., 1916. A method of measuring earth resistivity. *Bulletin of the Bureau of Standards*, 12, 4, 469-478, <http://dx.doi.org/10.6028/bulletin.282>.
- White, D. J., 2011. Geophysical monitoring of the Weyburn CO₂ flood: Results during 10 years of injection. *Energy Procedia*, 4, 3628-3635, doi: 10.1016/j.egypro.2011.02.293.
- White, D.J. for the Weyburn Geophysical Monitoring Team, 2011. Geophysical monitoring of the Weyburn CO₂ flood: Results during 10 years of injection. *Energy Procedia*, 4, 3628-3635, doi: 10.1016/j.egypro.2011.02.293.

- White, D., 2013. Seismic characterization and time-lapse imaging during seven years of CO₂ flood in the Weyburn field, Saskatchewan, Canada. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, doi: 10.1016/j.ijggc.2013.02.006.
- Wiese, B., Böhner, J., Enachescu, C., Würdemann, H., Zimmermann, G., 2010. Hydraulic characterisation of the Stuttgart formation at the pilot test site for CO₂ storage, Ketzin, Germany, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 4, 6, 960-971, doi: 10.1016/j.ijggc.2010.06.013.
- Wildenborg, T., Bentham, M., Chadwick, A., David, P., Deflandre, J.-P., Dillen, M., Groenenberg, H., Kirk K., Y. L. Gallo, Y. L., 2009. Large-scale CO₂ injection demos for the development of monitoring and verification technology and guidelines (CO₂ ReMoVe). *Energy Procedia*, 1, 1, 2367-2374, doi: 10.1016/j.egypro.2009.01.308.
- Würdemann, H., Kühn, M., Möller, F., Borm, G., Schilling, F. R., und die CO₂SINK-Group, 2009. Pilotprojekte zur CO₂-Speicherung in Deutschland. In: Stroink, L., Gerling, J. P., Kühn, M., Schilling, F. R. (Hrsg.), Die dauerhafte geologische Speicherung von CO₂ in Deutschland - Aktuelle Forschungsergebnisse und Perspektiven, Geotechnologien, *Science Report*, Nr. 14, 106-113, ISSN 1619-7399.
- Würdemann, H., Möller, F., Kühn, M., Heidug, W., Christensen, N. P., Borm, G., Schilling, F. R., 2010. CO₂SINK-From site characterisation and risk assessment to monitoring and verification: One year of operational experience with the field laboratory for CO₂ storage at Ketzin, Germany. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 4, 6, 938-951, doi: 10.1016/j.ijggc.2010.08.010.
- Xu, Z., Juhlin, C., Gudmundsson, O., Zhang, F., Yang, C., Kashubin A., Lüth, S., 2012. Reconstruction of subsurface structure from ambient seismic noise: an example from Ketzin, Germany. *Geophysical Journal International*, 189, 2, 1085–1102, doi: 10.1111/j.1365-246X.2012.05411.x.
- Xue, Z., Tanase, D., Watanabe, J., 2006. Estimation of CO₂ saturation from time-lapse CO₂ well logging in an onshore aquifer, Nagaoka, Japan. *Exploration Geophysics*, 37, 19-29, doi: 10.1071/EG06019.
- Xue, Z., Kim, J. W., Mito, S., Kitamura, K., Matsuoka, T., 2009. Detecting and Monitoring CO₂ With P-Wave Velocity and Resistivity From Both Laboratory and Field Scales. *Society of Petroleum Engineers, International Conference on CO₂ Capture, Storage, and Utilization*, San Diego, USA, doi: 10.2118/126885-MS.
- Xue, Z., 2012. Measuring the Performance of CO₂ Storage and Safety at Nagaoka Pilot Site. *Taiwan Symposium on Carbon Dioxide, Capture, Storage and Utilization, Road to Cleaner and Safer Prosperity*, Taipei, Taiwan.
- Yang, C., Juhlin, C., Enescu, N., Cosma, C., Lüth, S., 2010. Moving source profile data processing, modelling and comparison with 3D surface seismic data at the CO₂SINK project site, Ketzin, Germany. *Near Surface Geophysics*, 8, 601-610, doi: 10.3997/1873-0604.2010022.
- Yang, C., Fan, W., Juhlin, C., 2011. Coda-wave interferometry analysis of Synthetic time-lapse VSP data at CO₂SINK project site, Ketzin, Germany. *EAGE Borehole Geophysics Workshop - Emphasis on 3D VSP*, Istanbul, Turkey.
- Yang, X., Carrigan, C., 2013. *Persönliche Mitteilungen*. Die ERT-Daten (Abb. 2.11) liegen den CO₂-Sättigungsdaten aus Carrigan *et al.* (2013, Abb. 7) zugrunde.

- Yang, X., Chen, X., Carrigan, C. R., Ramirez, A. L., 2014. Uncertainty quantification of CO₂ saturation estimated from electrical resistance tomography data at the Cranfield site. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 27, 59–68, doi: 10.1016/j.ijggc.2014.05.006.
- Yang, X., Lassen, R. N., Jensen, K. H., Looms, M. C., 2015. Monitoring CO₂ migration in a shallow sand aquifer using 3D crosshole electrical resistivity tomography. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 42, 534-544, doi: 10.1016/j.ijggc.2015.09.005.
- Zeebe, R. E., Ridgwell, A., Zachos, J. C., 2016. Anthropogenic carbon release rate unprecedented during the past 66 million years. *Nature Geoscience*, doi: 10.1038/ngeo2681.
- Zettlitz, M., Möller, F., Morozova, D., Lokay, P., Würdemann H., 2010. Re-Establishment of the Proper Injectivity of the CO₂-Injection Well Ktzi201 in Ketzin, Germany. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 4, 6, 952-959, doi: 10.1016/j.ijggc.2010.05.006.
- Zhang, R., Ghosh, R., Sen, M. K., Srinivasan, S., 2013. Time-lapse surface seismic inversion with thin bed resolution for monitoring CO₂ sequestration: A case study from Cranfield, Mississippi. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 18, 430-438, doi: 10.1016/j.ijggc.2012.08.015.
- Zimmer, M., Erzinger, J., 2009: Gas membrane sampling device and gas sensor device for geological investigations. *U.S. Pat. No. 7,523,680 B2*.
- Zimmer, M., Pilz, P., Erzinger, J., 2011a. Long-term surface carbon dioxide flux monitoring at the Ketzin carbon dioxide storage test site. *Environmental Geosciences*, 18, 2, 119-130, doi: 10.1306/eg.11181010017.
- Zimmer, M., Erzinger, J. Kujawa, C., CO₂SINK Group, 2011b. The gas membrane sensor (GMS): A new method for gas measurements in deep boreholes applied at the CO₂SINK site. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 5, 4, 995-1001, doi: 10.1016/j.ijggc.2010.11.007.

Anhang

A.1 Tiefenangaben: verwendete Bezugssysteme in dieser Arbeit

Die Lage eines Punktes im Raum wird u.a. mittels seiner Höhe beschrieben, die sich dabei auf eine bestimmte Bezugsfläche (Bezugsniveau) bezieht. Eine solche Bezugsfläche kann die Geländeoberkante (GOK), aber auch Normalnull (Höhe über dem Meeresspiegel, NN) sein.

Bei abgeteuften Bohrungen ist es üblich, die Endteufe als Vertikaltiefe (wahre Tiefe, engl.: *true vertical depth*, TVD) anzugeben. Sie bezieht sich auf das Bezugsniveau der Geländeoberkante und wird als positiver Zahlenwert mit Maßeinheit (u GOK) angegeben. Auch für geologische Schichtgrenzen werden diese Vertikaltiefen benutzt.

Für geoelektrische Messungen im Bohrloch hingegen spielt die gewählte Bezugsfläche keine Rolle, da nur die relative Lage zueinander im Raum von Relevanz ist. Bei geoelektrischen Messungen an der Oberfläche spielt die Topographie eine ganz entscheidende Rolle. Bei geoelektrischen Oberflächenmessungen ist es üblich, die z-Koordinate der Oberflächenelektrode zum Bezugsniveau Normalnull anzugeben. Sie wird meist als Höhe über Normalnull (ü NN) beschrieben und hat entsprechend häufig einen positiven Zahlenwert.

Für geoelektrische Messungen kombiniert an der Erdoberfläche und in den Bohrungen muss für die z-Koordinaten der Bohrloch- und der Oberflächenelektroden ein gemeinsames Bezugsniveau vorliegen. Üblich ist dabei das Bezugsniveau Normalnull, um die Topographie der Oberflächenelektroden zu berücksichtigen.

Um die jeweils gängigen Koordinaten anzugeben, wird in dieser Arbeit sowohl die Bezugsfläche Geländeoberkante (GOK) als auch die Bezugsfläche Normalnull (NN) benutzt. Damit soll den jeweiligen Fachgruppen ein angenehmes Lesen ermöglicht werden. Die Möglichkeit der Verwirrung zwischen den Einheiten muss in Kauf genommen werden. Wo es der Lesbarkeit nicht abträglich ist, werden beide Werte angegeben.

Im Einklang mit den allgemein üblichen Standards werden die z-Koordinaten der Bohrlochelektroden in dieser Arbeit generell zum Bezugsniveau Normalnull angegeben und als Tiefen unter Normalnull (u NN) bzw. als Höhen über Normalnull (ü NN) bezeichnet, während die geologischen Schichten und Bohrlochteufen in Bezug zur Geländeoberkante gesetzt werden. Da die Bohrlochteufen und Schichttiefen als positiver

Zahlenwert mit Maßeinheit (u GOK) angegeben werden, werden die Elektrodentiefen in dieser Arbeit der Einfachheit halber ebenfalls als positiver Zahlenwert mit Maßeinheit (also als Tiefen u NN) angegeben. Für Berechnungen allerdings ist das Vorzeichen des Zahlenwertes von großer Bedeutung und verlangt eine Angabe der Elektrodentiefen als negativen Zahlenwert mit Maßeinheit (also als Höhen ü NN). Abbildung A.1 zeigt ein Rechenbeispiel der Beobachtungsbohrung Ktzi200 für die Tiefen- bzw. Höhenwerte der Oberkante der Bohrung, der Elektrodentiefe, sowie der Endteufe der Bohrung.

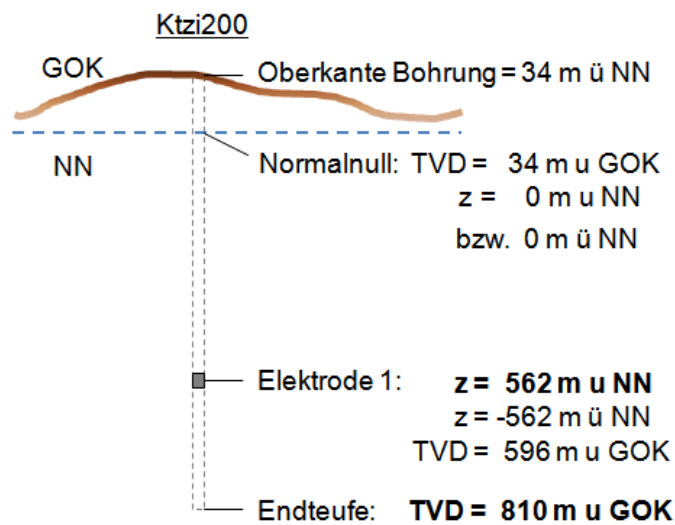


Abb. A.1: Prinzipskizze zur Darstellung der Bezugsflächen Geländeoberkante (GOK) und Normalnull (NN) für das Beispiel der z-Koordinate der Endteufe der Beobachtungsbohrung Ktzi200 und der z-Koordinate der Bohrlochelektrode 1, sowie zur Beschreibung der Oberkante der Bohrung.

A.2 Tabellen

Tab. A.1: Datum und Uhrzeit der jeweiligen Einzelmessungen der Ankopplungswiderstände während der Installation der Elektroden 1 bis 15 und des Einbaus der restlichen Rohre (Rohrtoure) in die Bohrung Ktzi200.

Nummer der Einzelmessung	Datum	Uhrzeit (Normalzeit)	Installationsfortschritt
1	05.05.07	13:42	2 Elektroden (15 -14) sind untertage installiert
2	05.05.07	14:07	3 Elektroden (15 -13) sind untertage installiert
3	05.05.07	14:52	4 Elektroden (15 -12) sind untertage installiert
4	05.05.07	15:28	5 Elektroden (15 -11) sind untertage installiert
5	05.05.07	15:50	6 Elektroden (15 -10) sind untertage installiert
6	05.05.07	16:16	7 Elektroden (15 - 9) sind untertage installiert
7	05.05.07	16:41	8 Elektroden (15 - 8) sind untertage installiert
8	05.05.07	17:26	9 Elektroden (15 - 7) sind untertage installiert
9	05.05.07	18:43	10 Elektroden (15 - 6) sind untertage installiert
10	05.05.07	19:31	11 Elektroden (15 - 5) sind untertage installiert
11	05.05.07	20:26	12 Elektroden (15 - 4) sind untertage installiert
12	05.05.07	20:52	13 Elektroden (15 - 3) sind untertage installiert
13	05.05.07	21:56	14 Elektroden (15 - 2) sind untertage installiert
14	05.05.07	22:08	15 Elektroden (15 - 1) sind untertage installiert
15	05.05.07	22:28	Einbau der 1. Rohrtour
16	05.05.07	22:43	Einbau der 2. Rohrtour
17	05.05.07	23:08	Einbau der 3. Rohrtour
18	05.05.07	23:25	Einbau der 4. Rohrtour
19	05.05.07	23:39	Einbau der 5. Rohrtour
20	05.05.07	23:49	Einbau der 6. Rohrtour
21	05.05.07	23:58	Einbau der 7. Rohrtour
22	06.05.07	00:07	Einbau der 8. Rohrtour
23	06.05.07	00:18	Einbau der 9. Rohrtour
24	06.05.07	00:27	Einbau der 10. Rohrtour
25	06.05.07	00:36	Einbau der 11. Rohrtour
26	06.05.07	00:46	Einbau der 12. Rohrtour
27	06.05.07	00:56	Einbau der 13. Rohrtour

28	06.05.07	01:10	Einbau der 14. Rohrtour
29	06.05.07	01:23	Einbau der 15. Rohrtour
30	06.05.07	01:33	Einbau der 16. Rohrtour
31	06.05.07	01:44	Einbau der 17. Rohrtour
32	06.05.07	01:54	Einbau der 18. Rohrtour
33	06.05.07	02:04	Einbau der 19. Rohrtour
34	06.05.07	02:15	Einbau der 20. Rohrtour
35	06.05.07	02:25	Einbau der 21. Rohrtour
36	06.05.07	02:35	Einbau der 22. Rohrtour
37	06.05.07	02:46	Einbau der 23. Rohrtour
38	06.05.07	02:57	Einbau der 24. Rohrtour
39	06.05.07	03:08	Einbau der 25. Rohrtour
40	06.05.07	03:18	Einbau der 26. Rohrtour
41	06.05.07	03:30	Einbau der 27. Rohrtour

Nummer der Einzelmessung	Datum	Uhrzeit (Normalzeit)	Installationsfortschritt
42	06.05.07	03:42	Einbau der 28. Rohrtour
43	06.05.07	03:53	Einbau der 29. Rohrtour
44	06.05.07	04:07	Einbau der 30. Rohrtour
45	06.05.07	04:19	Einbau der 31. Rohrtour
46	06.05.07	04:33	Einbau der 32. Rohrtour
47	06.05.07	04:45	Einbau der 33. Rohrtour
48	06.05.07	04:56	Einbau der 34. Rohrtour
49	06.05.07	05:08	Einbau der 35. Rohrtour
50	06.05.07	05:22	Einbau der 36. Rohrtour
51	06.05.07	05:34	Einbau der 37. Rohrtour
52	06.05.07	05:42	Einbau der 38. Rohrtour
53	06.05.07	05:54	Einbau der 39. Rohrtour
54	06.05.07	06:05	Einbau der 40. Rohrtour
55	06.05.07	06:16	Einbau der 41. Rohrtour
56	06.05.07	06:26	Einbau der 42. Rohrtour
57	06.05.07	06:38	Einbau der 43. Rohrtour
58	06.05.07	06:57	Einbau der 44. Rohrtour
59	06.05.07	07:12	Einbau der 45. Rohrtour
60	06.05.07	07:26	Einbau der 46. Rohrtour
61	06.05.07	07:39	Einbau der 47. Rohrtour

Tab. A.2: Datum und Uhrzeit (Normalzeiten) der jeweiligen Einzelmessungen der Ankopplungswiderstände in allen Bohrungen vor dem Start der CO₂-Injektion (Phase II), sowie (Vor-) Injektionsmaßnahmen in der Injektionsbohrung Ktzi201 und entsprechende CO₂-Injektionsraten nach Möller *et al.* (2012).

Nummer der Einzelmessung	Datum	Uhrzeit (Normalzeit)	(Vor-) Injektionsmaßnahmen in Ktzi201
1	29.05.07	17:23	
2	29.05.07	19:58	
3	29.05.07	19:59	
4	29.05.07	21:36	
5	29.05.07	21:46	
6	27.06.07	13:45	
7	06.07.07	10:19	
8	25.07.07	10:28	
9	25.07.07	10:32	
10	25.07.07	14:28	
11	06.09.07	16:58	
12	06.09.07	17:43	
13	25.09.07	14:01	
14	25.09.07	16:57	
15	25.09.07	17:17	
16	26.09.07	09:06	
17	26.09.07	12:16	
18	26.09.07	12:36	
19	26.09.07	14:03	
20	26.09.07	17:41	
21	26.09.07	18:24	
22	19.02.08	15:07	
23	20.02.08	00:49	
24	20.02.08	15:09	
25	21.02.08	15:14	
26	11.06.08	17:13	
27	16.06.08	15:46	N ₂ -Lift (16.-17.06.08)
28	17.06.08	10:15	N ₂ -Lift
29	17.06.08	22:44	KCl-Slug (17.-20.06.08)
30	19.06.08	08:37	KCl-Slug
31	19.06.08	12:15	KCl-Slug
32	19.06.08	14:33	KCl-Slug
33	19.06.08	16:27	KCl-Slug
34	19.06.08	17:59	KCl-Slug
35	19.06.08	20:44	KCl-Slug
36	20.06.08	00:28	KCl-Slug
37	20.06.08	09:39	Kr-Tracer und N ₂
38	20.06.08	14:07	CO ₂ -Testinjektion (30 l CO ₂ , 12 Uhr), anschließend N ₂ -Injektion
39	20.06.08	16:58	
40	20.06.08	18:19	
41	20.06.08	20:23	

Nummer der Einzelmessung	Datum	Uhrzeit (Normalzeit)	(Vor-) Injektionsmaßnahmen in Ktzi201
42	20.06.08	21:49	
43	20.06.08	23:27	
44	21.06.08	00:31	
45	21.06.08	03:02	
46	21.06.08	05:24	
47	21.06.08	06:40	
48	23.06.08	20:34	
49	23.06.08	22:57	
50	24.06.08	20:22	geringe CO ₂ -Injektionsrate ab 24.06.08
51	24.06.08	22:25	~ 0,44 t/h
52	25.06.08	01:25	~ 0,45 t/h
53	25.06.08	05:01	~ 0,43 t/h
54	25.06.08	08:16	~ 0,43 t/h
55	25.06.08	15:02	~ 0,92 t/h
56	25.06.08	19:42	CO ₂ -Injektionsrate ~ 0 t/h (ab 25.06.08, 17 Uhr bis 26.06.08, 8 Uhr)
57	26.06.08	15:34	~ 1,35 t/h
58	26.06.08	21:49	~ 1,02 t/h
59	27.06.08	08:08	~ 1,06 t/h
60	27.06.08	17:51	~ 1,16 t/h
61	28.06.08	17:23	~ 1,04 t/h
62	28.06.08	17:54	~ 1,04 t/h
63	29.06.08	13:10	~ 0,92 t/h

Tab. A.3: Datum und Uhrzeit der jeweiligen Einzelmessungen der festen Dipol-Dipol-Anordnung in der Injektionsbohrung Ktzi201 während der Phase II.

Nummer der Einzelmessung	Datum	Uhrzeit (Normalzeit)	Injektionsmaßnahmen in Ktzi201
1	20.06.2008	10:14	CO ₂ -Testinjektion (30 l CO ₂ , 12 Uhr), anschließend N ₂ -Injektion
2	20.06.2008	10:20	
3	20.06.2008	11:04	
4	20.06.2008	12:00	
5	20.06.2008	12:06	
6	20.06.2008	12:13	
7	20.06.2008	12:23	
8	20.06.2008	13:42	
9	20.06.2008	13:52	
10	20.06.2008	14:55	
11	20.06.2008	15:06	
12	20.06.2008	16:00	
13	20.06.2008	20:40	
14	20.06.2008	22:19	
15	21.06.2008	01:31	
16	21.06.2008	02:46	
17	21.06.2008	05:42	
18	21.06.2008	07:00	
19	21.06.2008	07:06	
20	21.06.2008	07:12	
21	21.06.2008	10:03	
22	21.06.2008	11:57	
23	21.06.2008	13:55	
24	21.06.2008	16:59	
25	21.06.2008	19:52	
26	21.06.2008	21:39	
27	22.06.2008	01:54	geringe CO ₂ -Injektionsrate (~ 0,42 t/h) (ab 24.06.08, 10 Uhr)
28	22.06.2008	05:50	
29	22.06.2008	21:09	
30	24.06.2008	09:58	
31	24.06.2008	10:00	
32	24.06.2008	10:00	
33	24.06.2008	10:04	
34	24.06.2008	10:06	
35	24.06.2008	10:08	
36	24.06.2008	10:10	
37	24.06.2008	10:14	~ 0,20 t/h
38	24.06.2008	10:18	
39	24.06.2008	10:36	
40	24.06.2008	11:08	
41	24.06.2008	11:27	
42	24.06.2008	11:46	

Nummer der Einzelmessung	Datum	Uhrzeit (Normalzeit)	Injektionsmaßnahmen in Ktzi201
43	24.06.2008	12:04	~ 0,36 t/h
44	24.06.2008	12:23	
45	24.06.2008	13:26	~ 0,57 t/h
46	24.06.2008	13:51	
47	24.06.2008	14:39	~ 0,43 t/h
48	24.06.2008	15:25	~ 0,95 t/h
49	24.06.2008	16:35	~ 0,86 t/h
50	24.06.2008	17:35	~ 0,97 t/h
51	24.06.2008	19:07	~ 0,30 t/h
52	24.06.2008	20:33	~ 0,42 t/h
53	24.06.2008	23:27	~ 0,44 t/h
54	25.06.2008	02:16	~ 0,45 t/h
55	25.06.2008	05:48	~ 0,43 t/h
56	25.06.2008	09:57	~ 0,35 t/h
57	25.06.2008	14:17	~ 0,34 t/h
58	25.06.2008	15:29	~ 0,92 t/h
59	25.06.2008	20:02	CO ₂ -Injektionsrate ~ 0 t/h (ab 25.06.08, 17 Uhr bis 26.06.08, 8 Uhr)
60	25.06.2008	22:51	~ 0 t/h
61	26.06.2008	21:01	~ 1,02 t/h
62	27.06.2008	21:30	~ 1,13 t/h
63	28.06.2008	21:23	~ 1,01 t/h
64	28.06.2008	22:35	~ 0,94 t/h
65	29.06.2008	17:03	~ 0,92 t/h

Tab. A.4: Datum und Uhrzeit (Normalzeiten) der jeweiligen Einzelmessungen der Ankopplungswiderstände in allen Bohrungen während der CO₂-Injektion (Phase III), sowie entsprechende CO₂-Injektionsraten nach Möller *et al.* (2012).

Nummer der Einzelmessung	Datum	Uhrzeit (Normalzeit)	Maßnahmen in Ktzi201
64	30.06.08	18:35	~ 0,51 t/h
65	01.07.08	17:01	~ 0,74 t/h
66	02.07.08	17:55	~ 2,42 t/h
67	02.07.08	22:04	~ 1,15 t/h
68	03.07.08	17:07	~ 0,52 t/h
69	04.07.08	16:59	~ 2,08 t/h
70	05.07.08	20:31	CO ₂ -Injektionsrate ~ 0 t/h (ab 05.07.08, 17 Uhr bis 10.07.08, 15 Uhr)
71	06.07.08	18:14	~ 0 t/h
72	11.07.08	15:19	~ 1,97 t/h
73	14.07.08	17:48	~ 2,11 t/h
74	15.07.08	17:40	~ 2,32 t/h
75	15.07.08	18:21	~ 2,29 t/h
76	15.07.08	20:34	~ 2,47 t/h
77	16.07.08	15:15	~ 0,73 t/h
78	05.08.08	07:40	~ 2,23 t/h
79	05.08.08	07:42	~ 2,23 t/h
80	05.08.08	09:20	~ 2,94 t/h
81	06.08.08	07:36	~ 2,02 t/h
82	07.08.08	07:42	~ 1,70 t/h
83	12.08.08	09:38	~ 1,55 t/h
84	15.08.08	09:34	~ 2,46 t/h
85	19.08.08	09:41	~ 1,94 t/h
86	27.08.08	10:27	CO ₂ -Injektionsrate ~ 0 t/h (ab 25.08.08, 3 Uhr bis 10.09.08, 12 Uhr)
87	09.09.08	09:41	~ 0 t/h
88	16.09.08	09:13	CO ₂ -Injektionsrate ~ 0,03 t/h (ab 10.09.08, 19 Uhr bis 24.09.08, 11 Uhr)
89	22.09.08	11:27	~ 0 t/h
90	06.10.08	09:53	~ 1,95 t/h
91	15.10.08	10:16	~ 1,92 t/h
92	20.10.08	09:02	~ 2,11 t/h
93	20.10.08	12:20	~ 2,03 t/h
94	31.10.08	14:20	~ 2,18 t/h
95	31.10.08	18:06	~ 1,86 t/h
96	10.11.08	10:12	~ 1,98 t/h
97	17.11.08	10:21	~ 1,87 t/h
98	24.11.08	10:37	~ 2,18 t/h
99	24.11.08	12:01	~ 2,17 t/h
100	24.11.08	13:09	~ 2,14 t/h
101	27.11.08	13:39	~ 2,80 t/h
102	08.12.08	10:55	~ 1,87 t/h

Nummer der Einzelmessung	Datum	Uhrzeit (Normalzeit)	Maßnahmen in Ktzi201
103	16.12.08	09:56	CO ₂ -Injektionsrate ~ 0,04 t/h (ab 11.12.08, 10 Uhr bis 16.12.08, 13 Uhr)
104	15.01.09	10:41	~ 2,43 t/h
105	26.01.09	09:21	~ 2,79 t/h
106	09.02.09	10:57	~ 2,86 t/h
107	04.03.09	09:39	~ 2,95 t/h
108	04.03.09	10:57	~ 2,92 t/h
109	18.03.09	10:46	~ 3,26 t/h
110	06.04.09	09:42	~ 2,67 t/h
111	13.05.09	15:41	~ 3,19 t/h
112	21.03.12	18:24	keine Daten

Tab. A.5: Datum und Uhrzeit der jeweiligen Einzelmessungen der festen Dipol-Dipol-Anordnung in der Injektionsbohrung Ktzi201 während der Phase III.

Nummer der Einzelmessung	Datum	Uhrzeit (Normalzeit)	Injektionsmaßnahmen in Ktzi201
66	01.07.2008	22:34	~ 0,24 t/h (erhöhte CO ₂ -Injektionsrate seit 30.06.08)
67	02.07.2008	20:28	~ 1,06 t/h
68	03.07.2008	20:57	~ 1,28 t/h
69	04.07.2008	20:47	~ 1,94 t/h
70	05.07.2008	22:22	CO ₂ -Injektionsrate ~ 0 t/h (ab 05.07.08, 17 Uhr bis 10.07.08, 15 Uhr)
71	06.07.2008	21:03	~ 0 t/h
72	07.07.2008	19:53	~ 0 t/h
73	08.07.2008	19:10	~ 0 t/h
74	09.07.2008	19:30	~ 0 t/h
75	10.07.2008	14:49	~ 0 t/h
76	15.07.2008	00:02	~ 2,41 t/h
77	15.07.2008	22:44	~ 2,46 t/h
78	16.07.2008	15:02	~ 0,73 t/h
79	18.07.2008	09:11	~ 2,98 t/h
80	21.07.2008	11:37	CO ₂ -Injektionsrate ~ 0 t/h (ab 18.07.08, 18 Uhr bis 01.08.08, 11 Uhr)
81	23.07.2008	09:40	~ 0 t/h
82	25.07.2008	10:04	~ 0 t/h
83	07.08.2008	07:54	~ 1,70 t/h
84	12.08.2008	12:08	~ 1,60 t/h
85	15.08.2008	11:45	~ 2,44 t/h
86	19.08.2008	12:08	~ 1,65 t/h
87	27.08.2008	12:21	CO ₂ -Injektionsrate ~ 0 t/h (ab 25.08.08, 3 Uhr bis 10.09.08, 12 Uhr)
88	09.09.2008	11:48	~ 0 t/h
89	16.09.2008	10:50	CO ₂ -Injektionsrate ~ 0,03 t/h (ab 10.09.08, 19 Uhr bis 24.09.08, 11 Uhr)
90	22.09.2008	13:38	~ 0 t/h
91	06.10.2008	11:36	~ 1,95 t/h
92	17.11.2008	12:30	~ 1,86 t/h
93	24.11.2008	13:22	~ 2,14 t/h
94	27.11.2008	16:02	~ 2,60 t/h
95	08.12.2008	13:08	~ 2,23 t/h
96	16.12.2008	11:30	CO ₂ -Injektionsrate ~ 0,04 t/h (ab 11.12.08, 10 Uhr bis 16.12.08, 13 Uhr)
97	15.01.2009	13:09	~ 2,84 t/h
98	26.01.2009	11:39	~ 2,74 t/h
99	09.02.2009	13:53	~ 2,58 t/h
100	04.03.2009	11:50	~ 2,86 t/h
101	13.05.2009	16:35	~ 3,16 t/h

Tab. A.6: Datum und Uhrzeit der jeweiligen Einzelmessungen der festen Dipol-Dipol-Anordnung in der Beobachtungsbohrung Ktzi200 während der Phase II und III.

Nummer der Einzelmessung	Datum	Uhrzeit (Normalzeit)	Bemerkungen
1	25.06.2008	23:58	Phase II: geringe CO ₂ -Injektionsrate in Ktzi201 (ab 24.06.08, Kap. 4)
2	26.06.2008	00:14	
3	27.06.2008	22:19	Phase III: erhöhte CO ₂ -Injektionsrate in Ktzi201 (ab 30.06.08, Kap. 4)
4	30.06.2008	22:50	
5	01.07.2008	21:47	CO ₂ -Ankunft an Beobachtungsbohrung Ktzi200 am 15.07.08 (GMS, Kap. 3.3.6)
6	02.07.2008	21:14	
7	04.07.2008	21:31	
8	05.07.2008	22:48	
9	06.07.2008	21:31	
10	07.07.2008	20:37	
11	08.07.2008	19:52	
12	09.07.2008	20:10	
13	14.07.2008	23:04	
14	15.07.2008	16:50	
15	15.07.2008	20:10	
16	16.07.2008	19:58	
17	18.07.2008	08:54	
18	21.07.2008	11:54	
19	23.07.2008	09:23	
20	25.07.2008	09:34	
21	27.08.2008	12:04	
22	02.09.2008	15:58	
23	09.09.2008	11:36	
24	16.09.2008	10:40	
25	22.09.2008	13:22	
26	29.09.2008	12:08	
27	06.10.2008	11:23	
28	15.10.2008	12:11	
29	20.10.2008	11:48	
30	10.11.2008	12:24	
31	17.11.2008	12:14	
32	24.11.2008	13:10	
33	27.11.2008	15:51	
34	16.12.2008	11:18	
35	15.01.2009	12:54	
36	26.01.2009	11:27	
37	09.02.2009	13:37	
38	04.03.2009	11:39	
39	18.03.2009	12:40	
40	06.04.2009	12:14	
41	13.05.2009	16:23	

Tab. A.7: Datum und Uhrzeit der jeweiligen Einzelmessungen der festen Dipol-Dipol-Anordnung in der Beobachtungsbohrung Ktzi202 während der Phase II und III.

Nummer der Einzelmessung	Datum	Uhrzeit (Normalzeit)	Bemerkungen
1	29.06.2008	18:14	Phase II: geringe CO ₂ -Injektionsrate in Ktzi201 (ab 24.06.08, Kap. 4) Phase III: erhöhte CO ₂ -Injektionsrate in Ktzi201 (ab 30.06.08, Kap. 4)
2	30.06.2008	23:15	
3	04.07.2008	21:54	
4	05.07.2008	23:02	
5	06.07.2008	21:47	
6	07.07.2008	20:55	
7	08.07.2008	20:13	
8	09.07.2008	20:30	
9	14.07.2008	23:30	
10	16.07.2008	20:21	
11	18.07.2008	09:28	
12	25.07.2008	10:20	
13	06.08.2008	09:29	
14	27.08.2008	12:33	
15	02.09.2008	16:20	
16	09.09.2008	11:59	
17	16.09.2008	11:01	
18	22.09.2008	13:53	
19	29.09.2008	12:30	
20	06.10.2008	11:47	
21	15.10.2008	12:43	
22	20.10.2008	12:06	
23	10.11.2008	12:46	
24	17.11.2008	12:46	
25	24.11.2008	13:33	
26	27.11.2008	16:12	
27	08.12.2008	18:19	
28	16.12.2008	11:41	
29	15.01.2009	13:26	
30	26.01.2009	11:54	
31	04.03.2009	12:01	
32	18.03.2009	13:02	
33	06.04.2009	12:42	CO ₂ -Ankunft an Beobachtungsbohrung Ktzi202 am 22.03.09 (GMS, Kap. 3.3.6)
34	13.05.2009	16:45	

Tab. A.8: Datum und Uhrzeit der jeweiligen Auswahl der Null- bzw. Wiederholungsmessung der geoelektrischen Messungen in Ktzi200, Ktzi201 und Ktzi202 aus Phase II und III.

Nummer der Auswahlmessung	Datum	Uhrzeit (Normalzeit)	Injektionsrate	Datenpunkte (für Inversion)
1	17.06. - 18.06.08	13:20 – 07:50	-	11.026 (15.762)
2	29.06.08	13:10 – 17:00	~ 0,88 t/h	4.588 (2.534)
3	04.07.08	17:35 – 20:45	~ 1,95 t/h	4.588 (2.515)
4	08.07.08	16:40 – 19:10	0 t/h	4.588 (2.625)
5	16.07.08	16:00 – 22:25	~ 0,81 t/h	4.588 (2.377)
6	05.08.08	07:45 – 09:35	~ 2,48 t/h	4.588 (2.192)
7	19.08.08	09:45 – 11:50	~ 1,80 t/h	3.411 (1.564)
8	09.09.08	09:45 – 12:30	0 t/h	4.314 (2.399)
9	22.09.08	11:25 – 15:10	0 t/h	4.314 (2.360)
10	29.09.08	09:55 – 13:20	~ 1,43 t/h	3.411 (1.528)
11	06.10.08	09:55 – 11:20	~ 1,95 t/h	3.411 (1.728)
12	24.11.08	10:35 – 14:55	~ 2,16 t/h	3.663 (1.813)
13	08.12.08	10:55 – 12:55	~ 2,16 t/h	3.411 (1.581)
14	09.02.09	10:55 - 12:45	~ 2,75 t/h	2.311 (993)
15	06.04.09	09:45 - 10:15	~ 3,17 t/h	3.660 (1.873)

Tab. A.9: Zusammenstellung der wichtigsten Parameter für die Inversionsberechnung der geoelektrischen Daten der geoelektrischen Bohrlochmessungen (Kap. 4) und der geoelektrischen Oberflächen-Bohrlochmessungen und Oberflächen-Oberflächenmessungen (Kap. 5) dieser Arbeit.

Parameter	Geoelektrische Bohrlochmessungen	Geoelektrische Oberflächen-Bohrlochmessungen und Oberflächen-Oberflächenmessungen
Netzparameter:		
Parameternetz (Inversion)	500 x 500 x 2.000 m	5.000 x 5.000 x 2.000 m
Sekundärfeldnetz (Vorwärtsmodellierung)	10.000 x 10.000 x 5.000 m	20.000 x 20.000 x 10.000 m
Inversionsparameter:		
Regularisierungsstärke λ	20	20

Tab. A.10: Gauß-Krüger-Koordinaten (Potsdam Datum, Bessel-Ellipsoid) der Oberflächendipole EO1 bis EO16 (CC und PP, jeweils als Elektrode A und B deklariert) der Kreisprofile, der Injektionsbohrung Ktzi201 und der beiden Beobachtungsbohrungen Ktzi200 und Ktzi202. Die Höhen beziehen sich auf Werte über Normalnull (ü. NN).

	Rechtswert	Hochwert	Höhe in m		Rechtswert	Hochwert	Höhe in m
EO1 A	4559822	5818256	34	EO1 B	4559977	5818267	29
EO2 A	4559598	5818953	39	EO2 B	4559681	5819080	37
EO3 A	4558962	5818896	32	EO3 B	4558903	5819028	34
EO4 A	4558203	5818640	38	EO4 B	4558100	5818755	33
EO5 A	4558059	5818090	26	EO5 B	4557899	5818099	35
EO6 A	4558436	5817127	32	EO6 B	4558451	5816979	35
EO7 A	4559397	5816996	34	EO7 B	4559396	5816854	36
EO8 A	4559953	5817276	28	EO8 B	4559989	5817130	27
EO9 A	4560910	5818348	36	EO9 B	4561058	5818343	34
EO10 A	4559862	5819732	47	EO10 B	4559874	5819882	54
EO11 A	4558527	5819767	48	EO11 B	4558440	5819911	48
EO12 A	4557601	5816912	31	EO12 B	4557537	5816842	32
EO13 A	4560084	5816601	29	EO13 B	4560118	5816457	28
EO14 A	4560763	5817818	34	EO14 B	4560906	5817805	28
EO15 A	4560792	5819315	38	EO15 B	4560910	5819420	43
EO16 A	4557557	5818738	37	EO16 B	4557430	5818806	33
Ktzi200	4559104	5817905	34				
Ktzi201	4559053	5817903	34				
Ktzi202	4559107	5818001	34				

A.3 Abbildungen

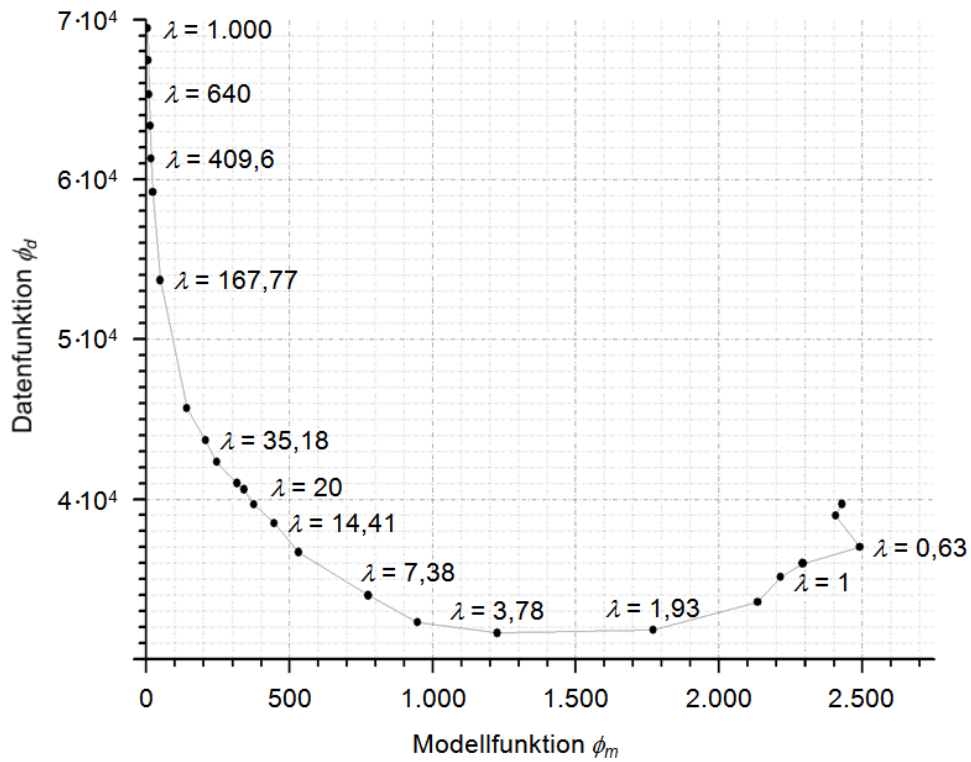


Abb. A.2: Beispiel einer L-Kurve (Darstellung der Datenfunktion ϕ_d über der Modellfunktion ϕ_m) zur Bestimmung der optimalen Regularisierung $\lambda_{opt}=20$ am Beispiel der geoelektrischen Messungen im Bohrloch vom 17./18.06.08 (Kap. 4.4.3)

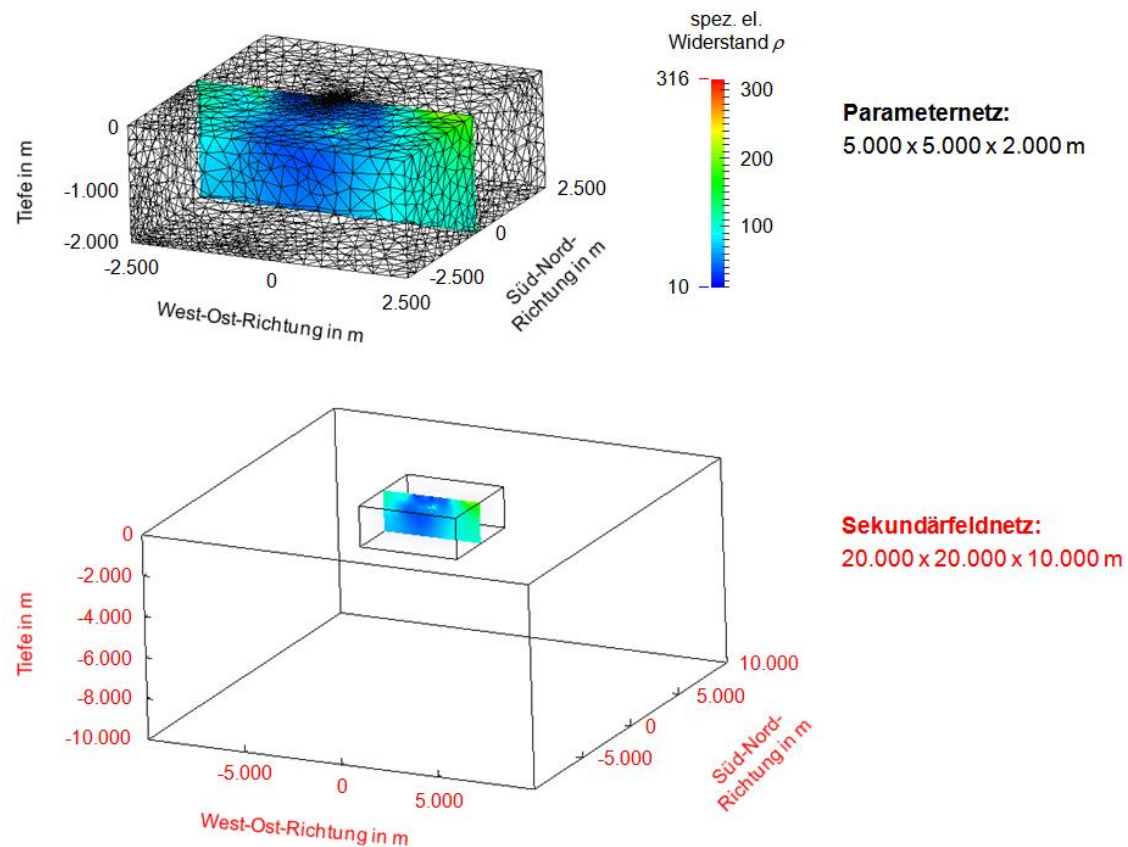


Abb. A.3: Darstellung des Parameternetzes (für die Inversion, oben) und die räumliche Ausdehnung des Sekundärfeldnetzes (für die Vorwärtsmodellierung, unten), wie sie für die geoelektrischen Oberflächen-Bohrlochmessungen und Oberflächen-Oberflächenmessungen dieser Arbeit (Kap. 5) genutzt wurden. Beispielhaft ist das Inversionsergebnis der zweiten Nullmessung (04/2008) als Vertikalschnitt zwischen der Injektionsbohrung Ktzi201 und der Beobachtungsbohrung Ktzi200 jeweils mit dargestellt (Abb. 5.7).

Abkürzungsverzeichnis

In dieser Arbeit benutzte Abkürzungen deutscher und englischer Fachbegriffe:

A, B	Stromelektroden A, B (engl.: <i>current electrodes C₁, C₂</i>)
BERT	Boundless Electrical Resistivity Tomography (Programmcode für Inversion geoelektrischer Daten)
BHP	bottom-hole pressure (dt.: <i>Reservoirdruck an der Bohrlochsohle/ Bohrlochboden</i>)
BL	Bohrloch
C ₁ , C ₂	current electrodes C ₁ , C ₂ (dt.: <i>Stromelektroden A, B</i>)
CAL	caliper log (dt.: <i>Kalibermessungen</i>)
CBL	cement bond log (dt.: <i>Zementationsbohrlochmessungen</i>)
CCS	carbon dioxide capture and storage (dt.: <i>Abscheidung und Speicherung von Kohlendioxid</i>)
CFU	Cranfield Unit (Kürzel für Bohrungen nahe der Ortschaft Cranfield, USA)
CO ₂	Kohlendioxid
CO ₂ CARE	CO ₂ Site Closure Assessment Research (europäisches Forschungsprojekt zur Förderung des Datenaustausches von Demonstrationsprojekten zur CO ₂ -Speicherung)
CO ₂ MAN	CO ₂ Reservoir Management (nationales Anschlussprojekt an CO ₂ SINK zur Fortführung der CO ₂ -Speicherüberwachung in Ketzin, sowie des Datenmanagements und der Öffentlichkeitsarbeit)
CO ₂ SINK	CO ₂ Storage by Injection into a Natural Saline Aquifer at Ketzin (wissenschaftliche Überwachung der CO ₂ -Speicherung in einen salinen Aquifer in Ketzin, sowie der Abschätzung und Minimierung von Speicherrisiken)
COMPLETE	CO ₂ post-injection monitoring and post-closure phase at the Ketzin pilot site (europäisches Forschungsprojekt zur Überwachung des Stilllegungsprozesses sowie des CO ₂ -Speichers nach Injektionsende)
COSMOS	CO ₂ Storage, Monitoring and Safety Technology (Verbundprojekt zur Entwicklung von wissenschaftlichen und technischen Grundlagen

	für eine sichere CO ₂ -Speicherung in Ketzin)
CSEM	controlled source electromagnetic (dt.: <i>aktive elektromagnetische Verfahren</i>)
CT	Computertomographie
DAS	Detailed Area Study (Detailgebietsstudie für geoelektrische Bohrlochmessungen am CO ₂ -Speicherstandort Cranfield, USA)
DC	direct current (dt.: <i>Gleichstrom</i>)
DLL	Dual-Laterolog (gerichtete Widerstandsbohrlochmessungen)
DLLd	Dual Laterolog Deep (gerichtete Widerstandsbohrlochmessung mit großer Eindringtiefe)
DLLs	Dual Laterolog Shallow (gerichtete Widerstandsbohrlochmessung mit geringer Eindringtiefe)
DTS	Distributed Temperature Sensing (dt.: <i>faseroptisches Temperatur-Sensorkabel</i> , für die tiefenabhängige Temperaturmessung in der Bohrung)
ECBM	Enhanced Coal Bed Methane recovery (dt.: <i>Methode zur verbesserten Förderung von natürlich gespeichertem Methan aus tiefen, stark ausgeförderten Kohleflözen</i>)
EEPR	European Energy Programme for Recovery (dt.: <i>Europäisches Energieprogramm zur Konjunkturbelebung</i>)
EGR	Enhanced Gas Recovery (dt.: <i>Methode zur verbesserten Erdgasgewinnung stark ausgeförderter Erdgaslagerstätten</i>)
EO	(Erd-)Oberfläche
EOR	Enhanced Oil Recovery (dt.: <i>Methode zur verbesserten Erdölgewinnung stark ausgeförderter Erdöllagerstätten</i>)
ERT	electrical resistivity tomography (dt.: <i>elektrische Widerstandstomographie</i>)
ET	Endteufe (Endtiefe)
EWG	Elastic Wave Generator (seismisches Fallgewicht)
FDM	finite difference method (dt.: <i>Finite-Differenzen-Methode</i>)
FEM	finite element method (dt.: <i>Finite-Elemente-Methode</i>)
FFT	fast Fourier transform (dt.: <i>schnelle Fourier-Transformation</i>)
GDP-32	Geophysical Data Processor receiver (Messgerät für elektrische Widerstandstomographie des US-amerikanischen Herstellers Zonge)

GeoTom	Messgerät für elektrische Widerstandstomographie des deutschen Herstellers Geolog2000
GMS	Gas Membrane Sensor (dt.: <i>Gasmembransensor</i> , zur Messung von Gaskonzentrationen im Bohrloch)
GOK	Geländeoberkante
HRLA	High-Resolution Laterolog Array tool (Bohrlochsonde für Widerstands- Bohrlochmessungen)
Hy	Kürzel für flache Grundwasser-Bohrung für hydrologische Fragestellungen
IPCC	Intergovernmental Panel of Climate Change (dt.: <i>Weltklimarat</i> , zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaveränderungen)
KCl	Kaliumchlorid
Kr	Krypton (chemischer Tracer/ Markierungsgas)
KSpG	Kohlendioxid-Speicherungsgesetz
KTB	Kontinentales Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland
Ktzi	Ketzin (Kürzel für Bohrungen nahe der Ortschaft Ketzin, Deutschland)
LVC	Long Valley Caldera (aktives vulkanisches Gebiet in Kalifornien, USA)
M, N	Spannungselektroden M, N (engl.: <i>potential electrodes P₁, P₂</i>)
MRT	Magnetresonanztomographie
MSP	moving source profiling (seismische Oberflächen-Bohrloch-Messung mit wandernder seismischer Quelle an der Erdoberfläche und festen Geophonkette im Bohrloch)
N ₂	Stickstoff
NEGB	Northeast German Basin (dt.: <i>Nordostdeutsches Becken</i>)
NN	Normalnull (Höhe über dem Meeresspiegel)
P ₁ , P ₂	potential electrodes P ₁ , P ₂ (dt.: <i>Spannungselektroden M, N</i>)
P300	Flache Grundwasser-Beobachtungsbohrung/ Pegelbohrung 300
PNG	pulsed neutron gamma (dt.: <i>Puls-Neutron-Gamma-Verfahren</i> , Verfahren zur Bestimmung von Kohlendioxid-Sättigungen)
P-Welle	Primärwelle (Longitudinalwelle)
RST	Rohrschuhteufe
SECARB	Southeast Regional Carbon Sequestration Partnership (US-amerikanisches Forschungsprojekt zur Bestimmung und

Charakterisierung geologischer CO₂-Speichermöglichkeiten im
Südosten der USA)

SO ₂	Schwefeldioxid
SP	spontaneous potentials/ self potentials (dt.: <i>elektrisches Potential/ Eigenpotential, EP</i>)
TDR	Time Domain Reflectometry (dt.: <i>Zeitbereichsreflektometrie</i> , Laufzeit-Reflexionsmessung)
TVD	true vertical depth (dt.: <i>Vertikaltiefe</i> , wahre Tiefen, auf Geländeoberkante bezogene Tiefen)
u NN	unter Normalnull
u GOK	unter Geländeoberkante
ü. NN	über Normalnull
Ug Ktzi	Untergrund Ketzin (Kürzel für Bohrungen im Untergrund nahe der Ortschaft Ketzin, Deutschland)
UGS	Untertagegasspeicher
VERA	Vertical Electrical Resistivity Array (dt.: <i>Vertikalelektrodensystem</i>)
VNG AG	Firma Verbundnetz Gas Aktiengesellschaft
VSP	vertical seismic profiling (dt.: <i>vertikale seismische Profile</i> , seismische Oberflächen-Bohrloch-Messung mit wandernder Geophonkette im Bohrloch und fester seismischer Quelle an der Erdoberfläche)
Wdh.	Wiederholung
XRD	X-ray diffraction (dt.: Röntgendiffraktometrie)
ZK	Zementkopf

Wissenschaftlicher Werdegang

Kießling, Dana

- | | |
|-------------------|---|
| 08/2013 – 07/2018 | Promotionsstudentin an der Fakultät für Physik und Geowissenschaften der Universität Leipzig |
| 01/2007 – 06/2010 | Wissenschaftliche Mitarbeiterin/ Promotionsstudentin am Helmholtz-Zentrum Potsdam GFZ, Deutsches GeoForschungsZentrum |
| 05/2005 – 12/2006 | Wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Fakultät für Physik und Geowissenschaften der Universität Leipzig |
| 02/2005 | Geophysik-Diplom an der Universität Leipzig
Diplomarbeit: „Hochauflösende, mehrfachüberdeckende Common Mid Point - Radarmessungen zur Bestimmung der Feuchteverteilung im Boden“ |
| 10/1999 - 02/2005 | Studium der Geophysik an der Universität Leipzig |